trimestriel septembre 2016

HORS SÉRIE 276

SCIENCE & VIE

MONDADORI FRANCE





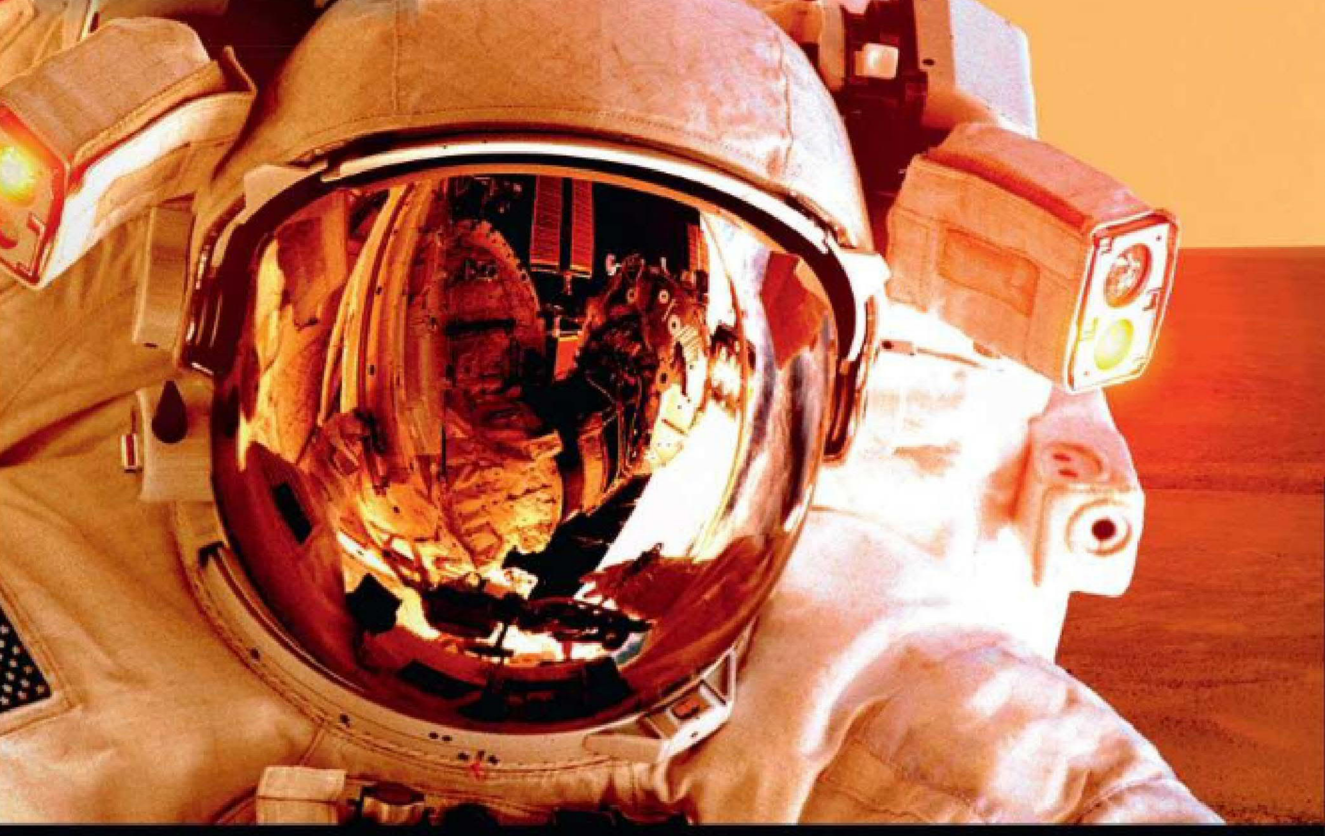


10 RÊVES D'ESPACE

CONSTRUIRE UNE BASE LUNAIRE

PLONGER DANS LES OCÉANS DE TITAN

ALLER SUR UNE AUTRE ÉTOILE…



BEL : 5,80 € - ESP : 5,90 € - GR : 5,90 €
DOM S : 5,90 € - DOM A : 7,50 € - ITA : 5,90 €
LUX : 5,80 € - PORT CONT : 5,90 €
CAN : 7,95 $CAN - MAR : 55 DH - TOM S : 790 CFP
TOM A : 1590 CFP - CH : 8FS - TUN : 8 DTU

M 02579 - 276H - F: 5,50 € - RD

XXIe, siècle de la conquête spatiale

HORS SÉRIE SCIENCE & VIE

Une publication du groupe MONDADORI FRANCE

Président: Ernesto Mauri

RÉDACTION
8, rue François-Ory
92543 Montrouge CEDEX
Tél.: 01 41 33 50 00 - Fax: 01 46 48 48 67
Directeur de la rédaction: Matthieu Villiers,
assisté de Christelle Borelli
Rédactrice en chef: Cécile Bonneau
Directrice artistique: Yvonne Diraison
Rédacteur en chef adjoint (édition): Grégoire Bouillier
Première secrétaire de rédaction: Anouk Delport
Secrétaire de rédaction: Pierre-André Orillard
Premier maquettiste: Jean-Michel Sabatié
Responsable du service photo: Clémence Gérard
Chef du service infographie: Boris Bellanger
Chef du service documentation: Marie-Anne Guffroy
Documentaliste: Frédéric Vladyslav
Service lecteurs: sev.lecteurs@mondadori.fr

Ont collaboré à ce numéro:
Pierre-Yves Bocquet, Serge Brunier, Simon Devos, Román Ikonicoff, Olivier Lapirot, Emmanuel Monnier, Alexandra Pihen

DIRECTION-ÉDITION
Direction pôle: Carole Fagot
Directeur délégué: Vincent Cousin

DIFFUSION
Site: www.vendezplus.com.
Directeur diffusion: Jean-Charles Guérault
Responsable diffusion marché: Siham Daassa

MARKETING
Responsable marketing: Giliane Douls
Chargée de promotion: Michèle Guillet
Abonnements: Nathalie Carrère

PUBLICITÉ
Directrice exécutive: Valérie Camy
Contacts publicité: Virginie Commun (50 28), Lionel Dufour (50 19)
Planning: Angélique Consoli (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)
Trafic: Véronique Barluet (50 12)

FABRICATION
Chefs de fabrication: Agnès Chatelet, Daniel Rougier

DIRECTEUR ADMINISTRATIF ET FINANCIER
Hervé Godard

FINANCE MANAGER
Guillaume Zaneskis

ÉDITEUR
Mondadori Magazines France
Siège social: 8, rue François-Ory
92543 Montrouge Cedex
Directeur de la publication: Carmine Perna
Actionnaire: Mondadori France SAS
Imprimeur: Elcograf - Italie
N° ISSN: 0151-0282
N° de commission paritaire: 1015 K 79977
Dépôt légal septembre 2016

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Par mail: relations.clients@mondadori.fr; par téléphone: 01 46 48 48 96 (de 8 h à 20 h du lundi au samedi); par courrier: Science & Vie Abonnements, B341, 60643 Chantilly Cedex. Par Internet: www.kiosquemag.com
États-Unis et Canada: Express Mag, 8155, rue Larrey, Anjou (Québec), H1J 2L5. Tél.: 1 800 363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais); fax: (514) 355-3332.
Suisse: Edigroup Suisse, 022 860 84 50
mondadori-suisse@edigroup.ch
Belgique: Edigroup Belgique, 070 233 304
mondadori-belgique@edigroup.be
Autres pays: nous consulter.
Commande d'anciens numéros et de reliures: tél. 01 46 48 48 97
relations.clients@mondadori.fr

SHUTTERSTOCK - COUVERTURE: SHUTTERSTOCK - ESA - DETLEV VAN RAVENSWAAY/SPL



Envies d'espace

Retourner sur la Lune? La prochaine fois, ce ne sera pas pour se contenter d'y poser le pied et d'y collecter quelques échantillons. Non, la prochaine fois, il s'agira d'y prendre pied pour de bon et d'y construire une base habitable avec les ressources localement disponibles. Ce projet semble fou? Il est pourtant défendu avec le plus grand sérieux par l'Agence spatiale européenne. Elle estime même qu'une dizaine d'années suffiraient à y parvenir. Plus loin, plus difficile aussi, la Nasa envisage d'envoyer des hommes sur Mars d'ici une vingtaine d'années. Mars, sur laquelle la société Space X imagine pouvoir établir, dans la foulée, une colonie humaine… Plus loin encore, ce sont les océans de Titan et d'Europe qui fascinent. Respectivement satellites de Saturne et de Jupiter, ils pourraient recevoir, dans les décennies à venir, la visite de robots et de sous-marins à la recherche d'éventuelles traces de vie.

Ce numéro *Hors-série* détaille dix des projets parmi les plus fascinants et les plus prometteurs de ce XXIe siècle. Tous n'iront sans doute pas à leur terme. D'autres, auxquels personne n'a encore songé à ce jour, s'inviteront probablement dans la course. Une seule chose est sûre: la conquête spatiale n'a pas fini de faire rêver les générations de Terriens à venir.

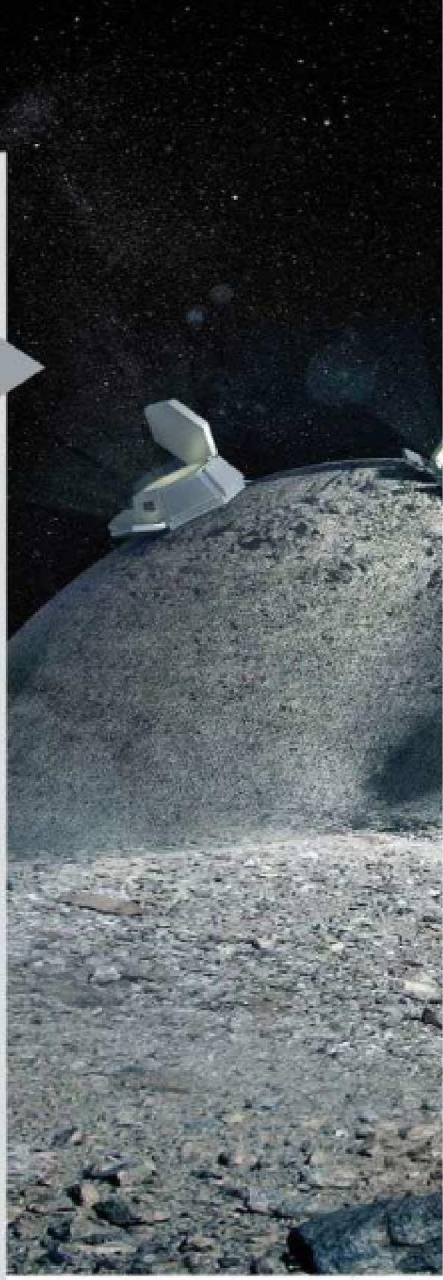
S&V-HS

HORS SÉRIE SCIENCE & VIE 276

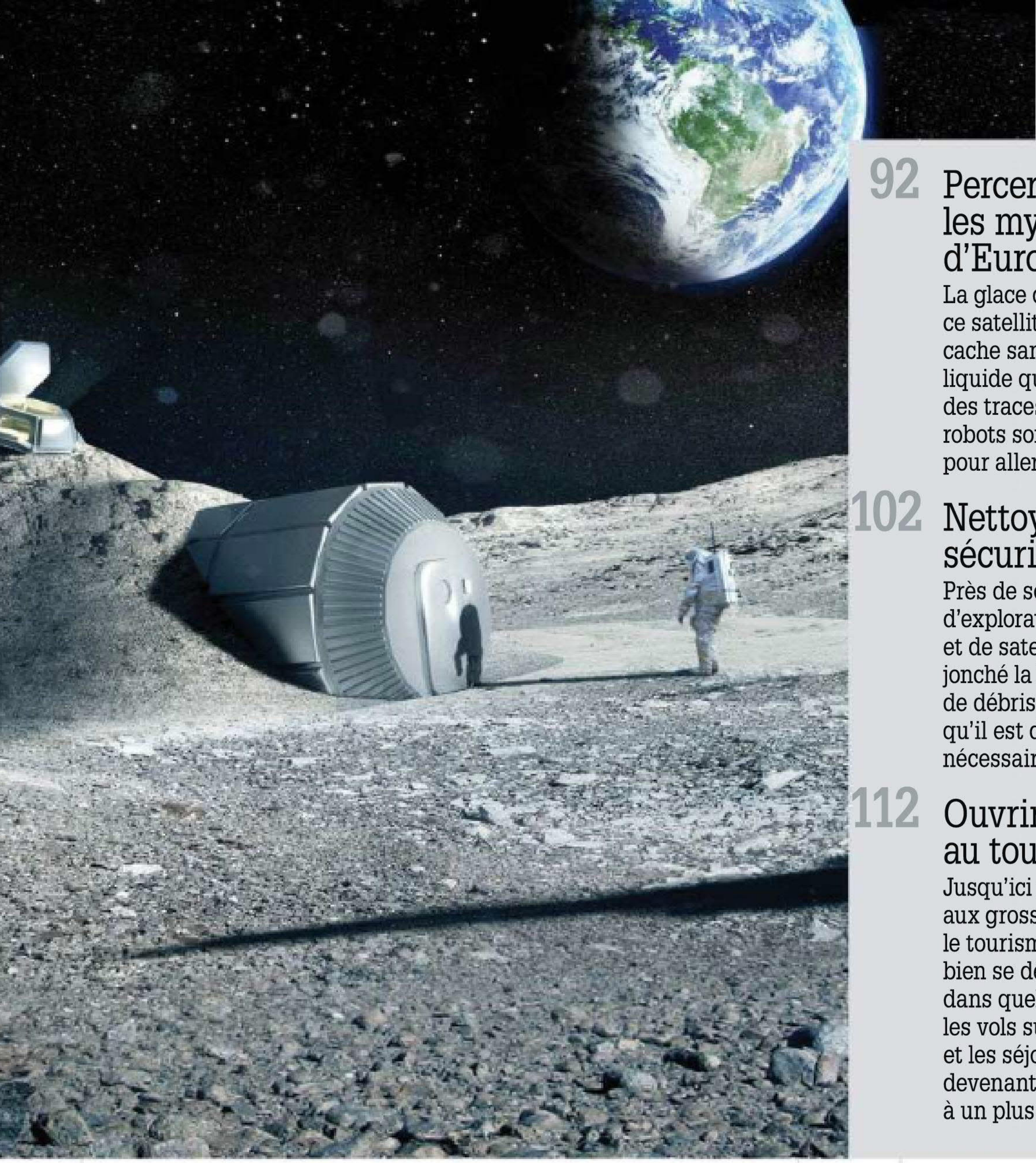
SEPTEMBRE 2016

Sommaire

10 RÊVES D'ESPACE











FOSTER & PARTNERS/ESA - B. VERSTEEG/ MARS ONE - SMAB/NASA



DOMESTIQUER LA LUNE

Par Pierre-Yves Bocquet



MISSION CHANG'E 5 (CHINE)

2017

Ce projet ambitionne de prélever puis de rapporter sur Terre un échantillon de 2 kg de sol lunaire. Une quantité record pour une mission non-habitée.

PROJET MOON EXPRESS (ÉTATS-UNIS)

2017

Cette start-up américaine se prépare à envoyer un rover sur la Lune pour en localiser les ressources gazières (hélium-3) et minières (terres rares).

PROSPECTION DES MÉTAUX (CORÉE DU SUD)

2020

Un rover sud-coréen devrait explorer la surface lunaire en quête de métaux rares sur Terre, pour en préparer une future exploitation commerciale.



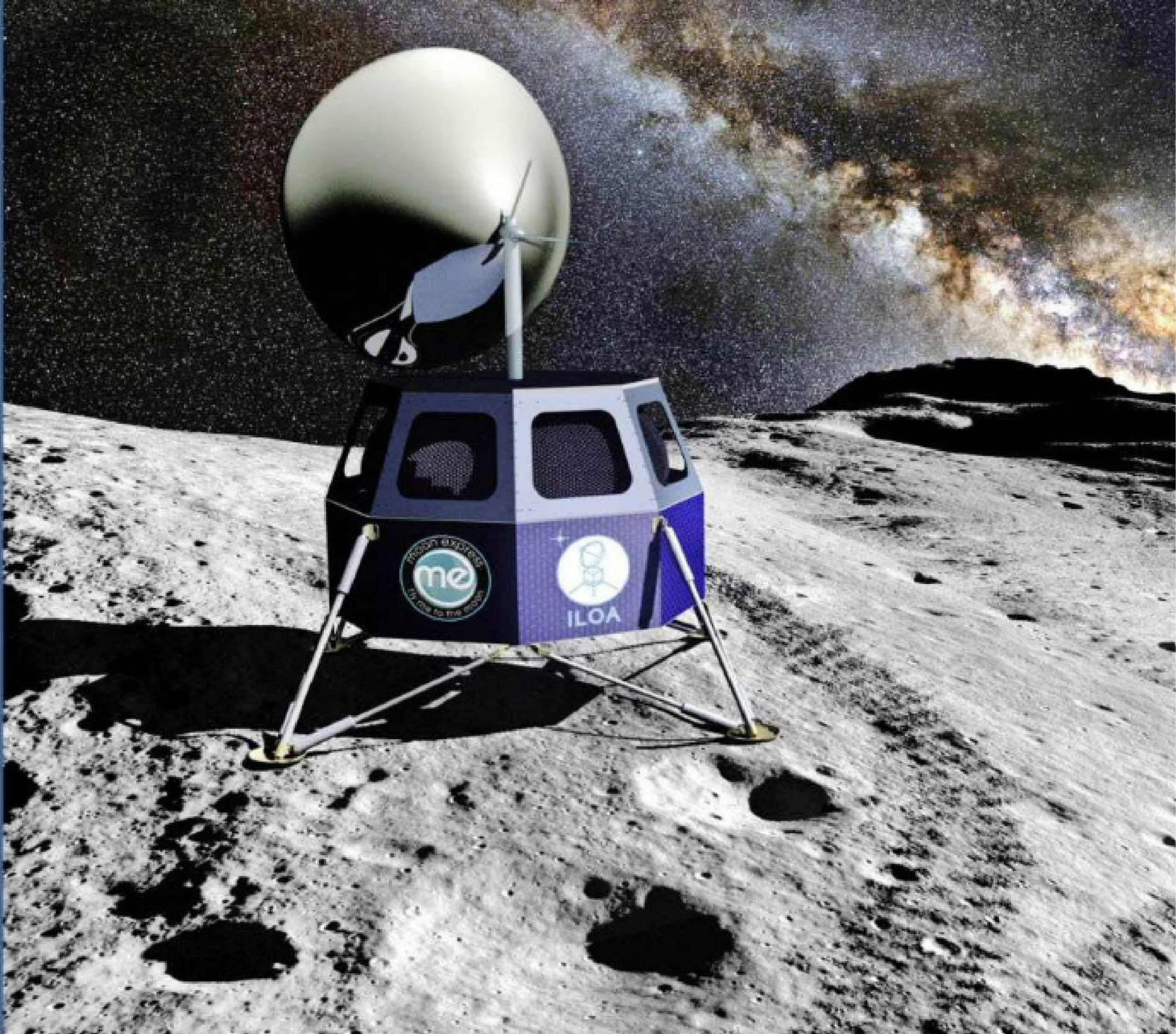
Objet céleste le plus proche de la Terre, la Lune a vite suscité l'intérêt scientifique. Dès 1609, Galilée pointe vers elle sa lunette astronomique, afin d'en dessiner les cratères. Le 23 mars 1840, elle est le premier astre à être photographié, à l'aide d'un daguerréotype, l'ancêtre de l'appareil photo. Sa face cachée ne sera révélée qu'en 1959 par la sonde russe Luna 3. Mais le point culminant de son exploration date bien sûr de 1969, avec la mission Apollo et l'envoi d'hommes sur son sol (12 en tout le fouleront en trois ans). Malgré cela, la Lune reste un objet de mystère quant à sa naissance et, surtout, à sa composition. Quelle quantité d'eau recèle-t-elle ? Dispose-t-elle de ressources de valeur ? D'où un intérêt continu, et les nombreuses velléités d'y retourner, notamment de la part des pays asiatiques. Ceux-ci voient là l'occasion d'affirmer leur puissance économique et de rattraper leur retard sur l'Occident, dont l'âge d'or spatial, avec ses budgets illimités, semble révolu. La Lune reste un enjeu géopolitique.

CONSTRUCTION D'UNE BASE LUNAIRE (ESA)

APRÈS 2026

Conçue à base de poussière lunaire, la base européenne permettrait enfin des missions habitées de longue durée sur la Lune.

ARIZONA STATE UNIV./GSFC/NASA



2017

Rapporter des échantillons de sol lunaire

La Chine ne cache plus ses ambitions lunaires. Avec la mission Chang'e 5, prévue pour 2017, elle prévoit d'envoyer un atterrisseur ainsi qu'un lanceur pour le retour, dans le but de rapporter sur Terre un échantillon de 2 kg de sol lunaire ! Une quantité record pour une mission non-habitée (les sondes robotisées russes du programme Luna n'avaient permis de ramener que 320 g environ). Avec un vrai « plus » scientifique : protéger ces échantillons afin d'assurer leur parfaite intégrité jusqu'au retour sur Terre. En effet, malgré les poussières russes et les quelque 382 kg d'échantillons récoltés par le programme américain Apollo, la connaissance de la composition des roches lunaires reste très partielle, ces dernières ayant été chimiquement altérées au contact de l'air durant leur voyage retour, avant d'être analysées sur Terre. La Chine a d'ailleurs annoncé en début d'année la mise au point d'un dispositif de contrôle de la conservation sous vide pour assurer la protection de ses futurs échantillons. Démarré en 2007 avec la sonde orbitale *Chang'e 1* chargée de cartographier la surface lunaire, le programme chinois avait déjà réalisé une prouesse avec Chang'e 3, en 2013. Cette mission était parvenue à poser un rover baptisé Lapin de jade sur notre satellite, lequel avait permis la découverte d'une sorte de roche lunaire jusqu'ici inconnue. Dans la lignée de ce programme, la mission Chang'e 5 représentera une étape supplémentaire qui permettra à la Chine de muscler son expérience en vue d'atteindre son but ultime : une mission habitée vers la Lune à l'horizon 2025-2030.

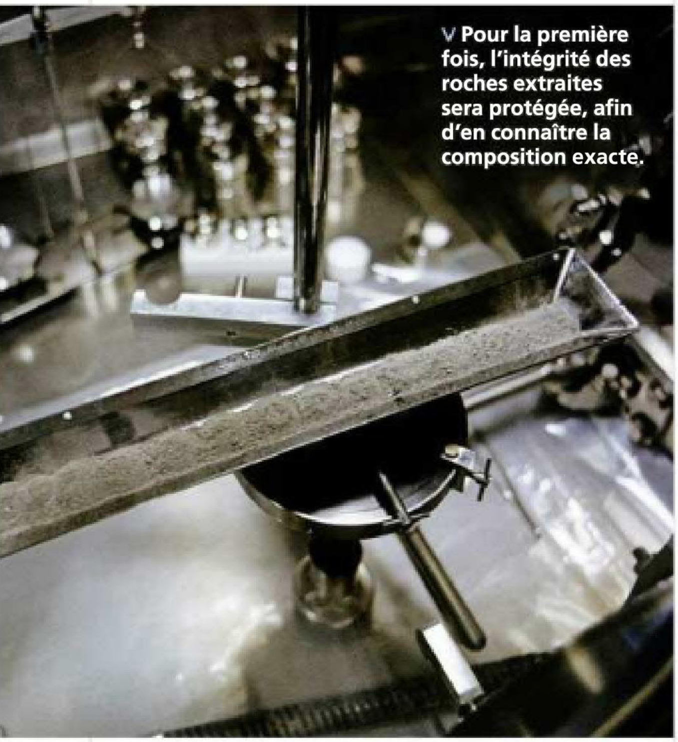


2017

Repérer les gisements d'hélium

Porté par une start-up de la Silicon Valley, le projet Moon Express (du nom de la société) prévoit d'envoyer en 2017 un rover sur la Lune. L'objectif : localiser, en vue d'une future exploitation commerciale, les ressources minières et gazières, notamment l'hélium-3. Ce gaz, très recherché pour son potentiel d'utilisation en fusion nucléaire, est très rare sur Terre, mais surabondant sur la Lune : présent dans le vent solaire, il n'est ni repoussé par son champ magnétique, ni piégé dans son atmosphère, puisqu'elle ne possède quasiment ni l'un ni l'autre. L'hélium s'est ainsi accumulé pendant des milliards d'années dans les premiers mètres de la surface lunaire. Selon des estimations, la Lune en contiendrait près de 100 000 tonnes. Fin 2014, Moon Express a testé avec succès son robot-atterrisseur MX-1 (un engin propulsé au peroxyde d'hydrogène et alimenté à l'énergie solaire) sur la piste du Kennedy Space Center Shuttle Landing Facility de la Nasa, en Floride. Moon Express a ensuite annoncé, à la fin de 2015, un partenariat avec Rocket Lab, une autre start-up californienne, qui se chargera du lancement avec le véhicule *Electron*, propulsé par un moteur-fusée innovant baptisé Rutherford, presque intégralement imprimé en 3D. En juin 2016, le projet a franchi une étape majeure : Moon Express est devenue la première compagnie privée à recevoir l'approbation de la Federal Aviation Administration américaine pour une mission lunaire à vocation commerciale, prévue pour fin 2017. Le projet Moon Express devient ainsi l'un des grands favoris du concours Google Lunar XPrize, doté de 30 millions de dollars, dont le vainqueur sera la première équipe qui parviendra à poser un rover sur la Lune avant 2018. L'identification et l'évaluation des gisements d'hélium-3 fait également partie des objectifs secondaires de la mission chinoise Chang'e 5.

< Une fois posé sur la Lune, le rover de Moon Express y cherchera des gisements d'hélium à exploiter ultérieurement.



V Pour la première fois, l'intégrité des roches extraites sera protégée, afin d'en connaître la composition exacte.

2020

Trouver des métaux rares sur Terre

Un des derniers candidats déclarés à la course à la Lune est la Corée du Sud. Le pays du Matin calme a lancé au début de 2014 un programme de R&D en vue de développer les techniques nécessaires à l'exploration de la Lune. À la fin de 2015, un premier calendrier a été dévoilé : le projet débutera par la mise en orbite lunaire d'une sonde dès 2018, en vue d'y faire atterrir un rover en 2020. L'objectif du robot : explorer la surface en vue d'y trouver des métaux rares (sur Terre), pour une potentielle exploitation. Une carrière ou une mine sur la Lune ? Une idée pas aussi farfelue qu'il n'y paraît : plusieurs projets (dont Moon Express, en plus de l'hélium-3) prévoient ce type d'exploitation, que les grandes agences aérospatiales trouvent réaliste : en février dernier, Jan Wörner, le directeur général de l'Agence spatiale européenne (ESA), confiait à l'AFP que la Lune pourrait être un endroit « *intéressant* » pour une exploitation minière privée des ressources de l'espace. Le planning coréen est, en tout cas, ambitieux : un test de lancement de fusée devrait avoir lieu dès 2017.

PRNEWSFOTO/ILOA & MOON EXP, INC. - SPL/AKG



FOSTER & PARTNERS - ESA

APRÈS 2026

Une base lunaire... à imprimer en 3D

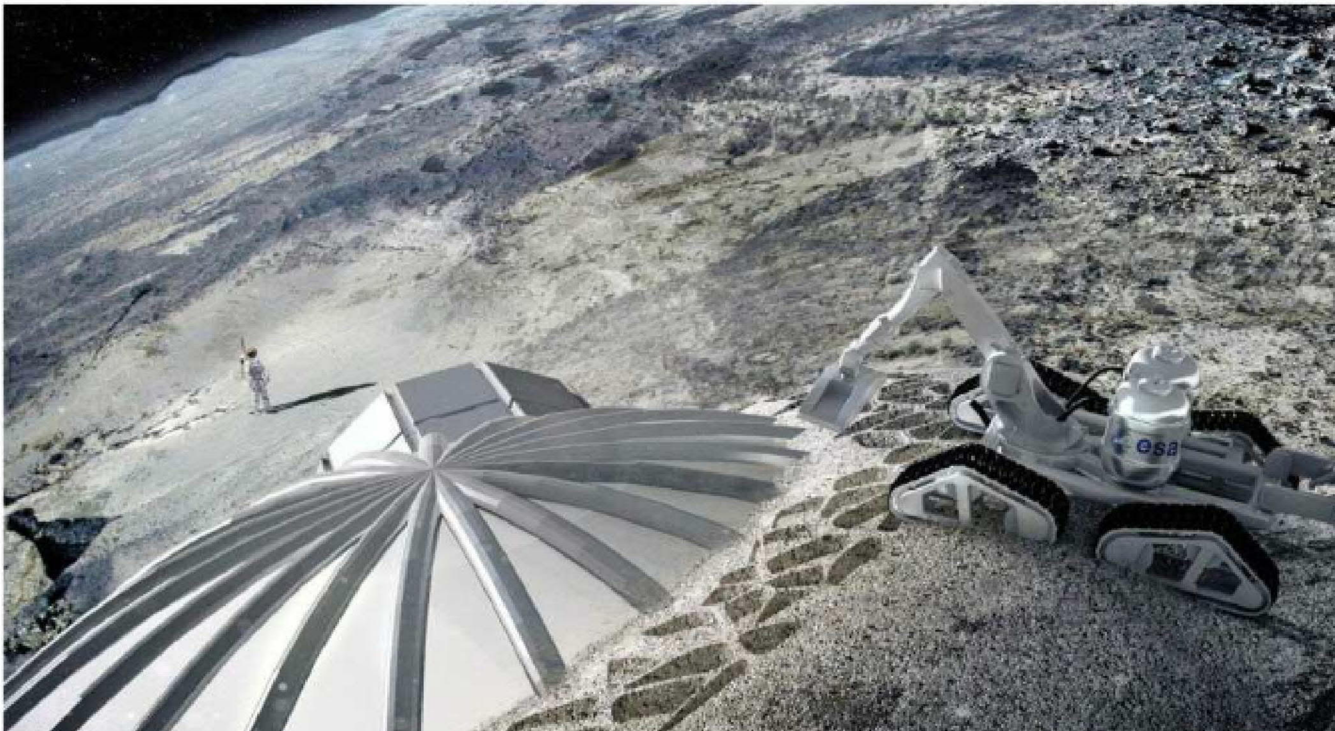
L'Agence spatiale européenne a imaginé une méthode ingénieuse qui pourrait enfin permettre à l'homme d'habiter sur la Lune. Une étape essentielle si l'on veut un jour exploiter les ressources naturelles présentes dans son sol.

Construire une base habitable sur la Lune : un vieux rêve de l'homme. On en trouve d'ailleurs de nombreuses traces dans la littérature, la bande dessinée, les jeux vidéo et le cinéma de science-fiction, comme *2001, l'Odyssée de l'espace*, pour ne citer que l'un des exemples les plus marquants. Que ce soit à des fins scientifiques, pour en exploiter les ressources ou pour servir de camp de base en vue d'une exploration spatiale plus lointaine (vers Mars notamment), les très sérieuses agences spatiales caressent elles aussi depuis longtemps le rêve de coloniser le satellite de la Terre.

Las, tous ces beaux projets sont pour l'instant restés sans suite. Difficultés techniques, autres



Disposer d'une base habitable sur la Lune est un rêve ancien, que l'homme n'a jamais réussi à concrétiser.



priorités spatiales et budgets rabotés ont eu raison de cette glorieuse ambition. Certes, l'homme sait depuis 1969 aller sur la Lune. Mais y installer une base présente des défis sans commune mesure, qui ont jusqu'ici découragé les grandes puissances de se lancer dans l'aventure.

Une telle odyssée représente en effet une équation biologico-technico-économique qui, pour l'heure, n'a pas trouvé de solution satisfaisante. La survie d'hommes dans l'espace sur une longue durée est conditionnée par un critère déterminant : leur protection contre les effets dévastateurs du rayonnement cosmique. Omniprésent dans l'espace, ce flux radioactif de noyaux atomiques et de particules à haute énergie est émis par les étoiles – dont le Soleil – à une vitesse proche de celle de la lumière. Un flux qui peut traverser le tissu humain et interférer avec l'ADN des cellules. Comme avec tout rayonnement radioactif, l'exposition doit donc être limitée, afin de limiter les effets sur la santé, en particulier les risques de cancer.

Sur Terre, l'action conjuguée du champ magnétique et de l'atmosphère permet de dévier et d'absorber la quasi-totalité de ce rayonnement, et donc de nous en protéger. Il en va de même pour les habitants de la Station spatiale internationale : en orbite basse (environ 350 km d'altitude), elle bénéficie de la protection du champ magnétique terrestre. Mais sur la Lune, dépourvue de ces deux boucliers naturels, rien ne protégerait les colons du rayonnement, ce qui limite leur mission à quelques semaines ou moins. D'autant plus que ce dernier connaît des pics imprévisibles. L'étude des glaces polaires terrestres a, en effet, révélé que depuis quelques centaines d'années, des éruptions solaires ont, à plusieurs reprises, provoqué des rayonnements de magnitudes qui auraient été mortelles pour des astronautes présents dans l'espace au même moment. Avec une mission de plusieurs mois, voire plusieurs années sur une base lunaire, la probabilité qu'un tel événement se produise devient suffisamment préoccupante pour qu'elle exige la mise en place d'une parade.

La survie d'hommes dans l'espace est conditionnée par leur protection contre les effets du rayonnement cosmique

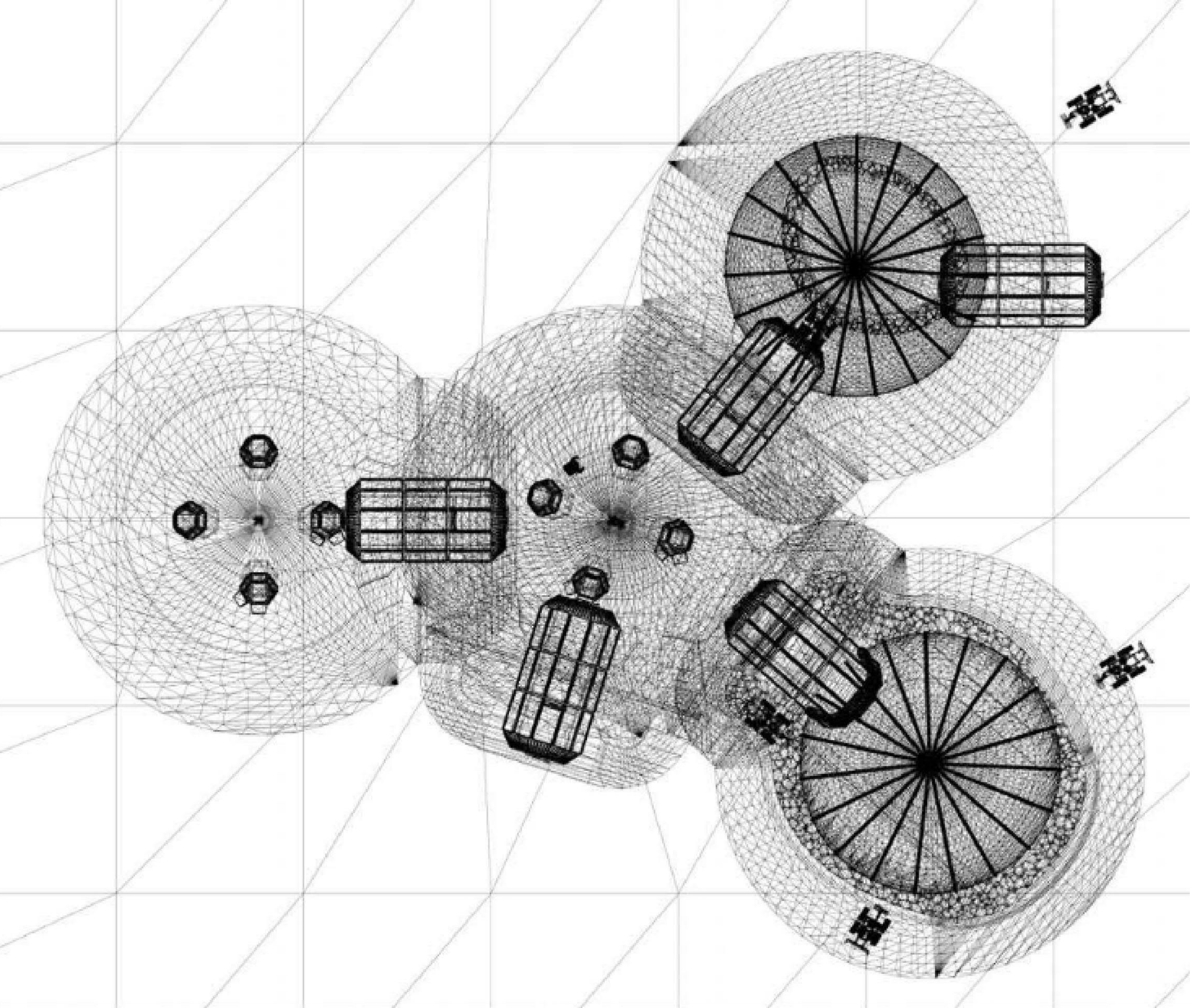
Et c'est là qu'intervient la composante technico-économique de l'équation. La protection contre le rayonnement passe en effet soit par la création d'un champ magnétique local, pour recréer le bouclier terrestre à une échelle plus petite afin de dévier le flux, soit par l'ajout de matière pour piéger les rayons, avant qu'ils ne fassent la peau des valeureux colons. Deux solutions qui imposent l'envoi sur la Lune d'un lourd matériel, en plus de l'équipement nécessaire à la construction de la base. Ce qui plombe fatalement le coût d'un tel projet : il faut dépenser plus de 10 000 euros pour arracher le moindre kilogramme à la gravité terrestre ! *« La durée d'une mission habitée sur la Lune serait limitée par la capacité à faire écran aux radiations cosmiques, à savoir par l'épaisseur et la densité des parois de la base. En la matière, mieux vaut utiliser du plomb que de l'aluminium »*, précise Laurent Pambaguian », ingénieur matériaux à l'ESA. Encapsuler une base lunaire entière dans du plomb pour la rendre étanche aux rayons cosmiques représenterait un poids, et donc un coût, démesurés ! C'est en grande partie la difficulté à résoudre cette équation qui a jusqu'ici tenu en échec toute velléité de colonisation lunaire.

UTILISER LE MATÉRIAU PRÉSENT LÀ-HAUT

Or, voici qu'une nouvelle piste élégante et ambitieuse visant à résoudre ce casse-tête vient d'être avancée par l'Agence spatiale européenne (ESA). Sa solution : ne pas embarquer dans un lanceur les matériaux nécessaires à la construction de la base et à sa protection contre le rayonnement, mais les récolter sur place ! L'agence a en effet démontré qu'il serait possible de construire une base lunaire suffisamment protectrice en utilisant comme matériau de construction le régolite, cette couche de poussières de roche issue du bombardement de météorites qui recouvre la quasi-totalité du sol lunaire, sur plusieurs mètres d'épaisseur.

L'astuce de l'ESA consiste à exploiter une technologie émergente qui révolutionne déjà de nombreux domaines sur Terre : l'impression 3D. Cette technique de fabrication dite « additive » consiste à déposer de la matière et à la solidifier couche après couche, afin de construire l'objet voulu à partir d'un plan numérique conçu sur ordinateur. Initialement utilisée avec de la résine polymère, l'impression 3D recouvre aujourd'hui diverses techniques et s'étend à un nombre grandissant de matériaux (lire *S&V* n° 1157). D'où l'idée qui a germé à l'ESA au début du projet, en 2012 : serait-il possible de solidifier du régolite à l'aide d'une imprimante 3D ?

FOSTER & PARTNERS

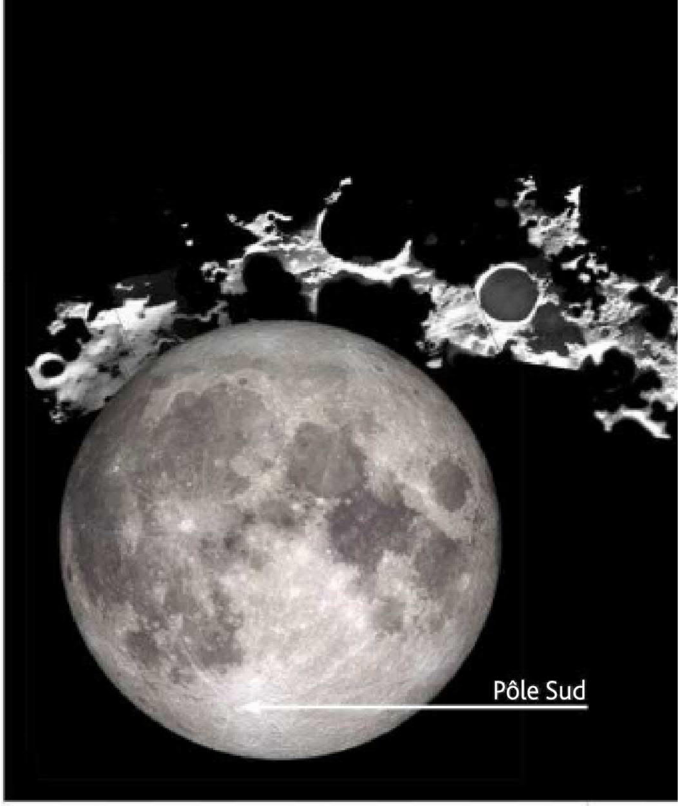




DES DÔMES GONFLABLES SOUS UNE COQUE RIGIDE

Reliés entre eux par des modules tubulaires, les dômes d'habitation de la base lunaire, gonflables et sur deux niveaux, seront recouverts d'une paroi protectrice fabriquée en 3D par de petits rovers.

L'agence a fait appel à Monolite UK, une entreprise créée en 2006 par Enrico Dini, inventeur d'une imprimante 3D spécialement conçue pour fabriquer… des habitations ! Alors que la plupart des imprimantes ne fabriquent que des objets de quelques centimètres pour les modèles grand public, voire quelques dizaines de centimètres pour les versions professionnelles, la D-Shape d'Enrico Dini, l'une des pionnières sur le créneau des très grandes imprimantes 3D, affiche des dimensions pharaoniques : sa structure mesure 6 mètres sur 6 au sol, pour 4 mètres de hauteur !



UNE RÉACTION CHIMIQUE DATANT DE 1855

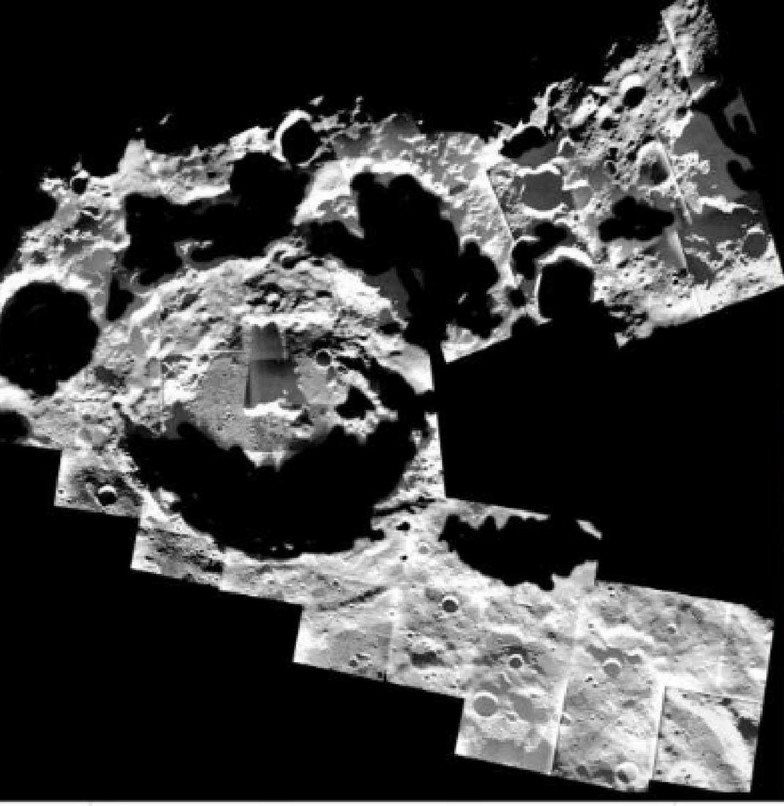
Breveté en 2008, le fonctionnement de la D-Shape est unique. Quand les autres imprimantes 3D utilisent un matériau chauffé puis déposé (ou déposé puis chauffé) à l'endoit voulu, qui acquiert sa résistance en se refroidissant, la D-Shape a recours à une réaction chimique entre un substrat (du sable) et un liant (une solution liquide à base de sels de magnésium), sur le modèle de la réaction chimique d'hydratation du ciment. Elle commence par étaler au sol, à l'aide d'un racloir, une fine couche de sable, de 5 à 10 mm d'épaisseur. Puis la rampe horizontale de 6 mètres de long, dotée de 300 buses espacées de 20 millimètres, balaye cette surface en aspergeant le liant aux endroits souhaités. La réaction chimique permet alors de faire durcir le sable, sur le même principe que le ciment Sorel à base de magnésium imaginé par le chimiste français éponyme en 1855. Une nouvelle couche de sable est ensuite déposée, et ainsi de suite. Le résultat : une matière qui ressemble à du grès, dotée d'une structure microcristalline et d'une résistance à la traction supérieure à celle du béton, et ne nécessitant donc pas d'être renforcée par de l'acier.

Mais pour tester ce dispositif avec de la poussière lunaire, l'équipe s'est confrontée à un premier défi de taille : comment trouver le régolite nécessaire ? Impossible d'utiliser les échantillons ramenés par les missions russes et américaines : il n'en existe que 382 kg dans le monde, dont une majorité détenue par la Nasa, et il est naturellement hors de question de jouer aux apprentis sorciers avec. L'équipe s'est d'abord tournée vers le régolite artificiel proposé par la Nasa : un mélange terrestre de composition très proche, à savoir près de 40 % d'oxyde de silicium, additionné à un mélange d'oxydes de sodium, d'aluminium, de potassium, de magnésium, de calcium, de titane, de fer… *« Mais il est vendu près de 20 euros le kilo. Sachant qu'il nous en fallait 3 à 4 tonnes pour imprimer un bloc de grande taille, il nous a fallu chercher une autre solution »*, souffle Laurent Pambaguian. À partir de cendres volcaniques trouvées aux alentours du lac de Bolsena, en Italie, Enrico Dini a finalement réalisé son propre mélange, très proche de la composition chimique du régolite lunaire.

Restait à vérifier que cet ersatz de poussière sélène puisse se solidifier avec la D-Shape dans des conditions lunaires… Mission que l'ESA a confiée au cabinet d'étude italien spécialisé en aéronautique Alta, racheté depuis par Sitael. *« Notre principale tâche a consisté à adapter cette technologie à un environnement très sévère : vide, températures extrêmes variant de –240° à 130 °C, radiations cosmiques, etc. »*, détaille Giovanni Cesaretti, responsable des ventes chez Sitael. La difficulté majeure a été posée par le liant. Si sa composition à base de magnésium s'est avérée compatible avec le régolite – il parvenait bien à solidifier –, sa mise en œuvre, elle, posait problème : impossible d'asperger un liquide sur la Lune, au risque de le voir s'évaporer instantanément dans le vide ambiant !

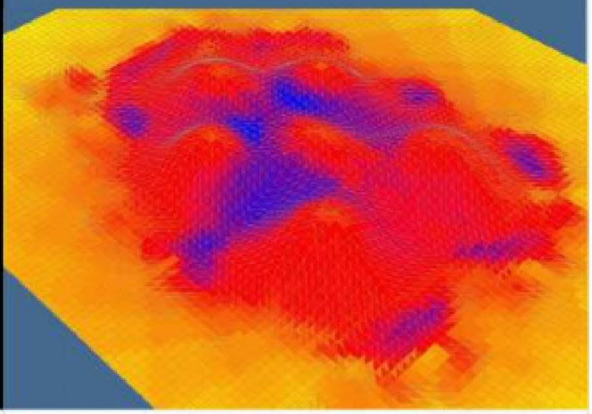
« Plutôt que d'asperger le liant sur la surface, nous avons donc conçu un système à base d'aiguille,

Tester le procédé avec du véritable régolite lunaire est impossible : pas question de jouer avec les 382 kg existants



UNE BASE SITUÉE AU PÔLE SUD

Le pôle Sud de la Lune offre un double intérêt pour une base habitée. Le fond de ses cratères, toujours dans l'ombre, pourrait receler de la glace, donc de l'eau. Tandis que leurs crêtes, presque toujours éclairées, pourraient être équipées de réflecteurs solaires produisant de l'énergie.



ESA

comme une seringue, pour injecter le liant sous la poussière, dévoile Giovanni Cesaretti. *De cette façon, nous avons évité l'évaporation du liquide qui a ainsi suffisamment de temps pour réagir, y compris dans le vide, pour produire la solidification du régolite artificiel. »* Un test dans une chambre sous vide sur un échantillon de poussières de 40 cm de longueur, sur 10 cm de largeur et 10 cm de hauteur s'est ainsi avéré concluant.

RÉSISTER AUX RAYONS ET AUX MÉTÉORITES

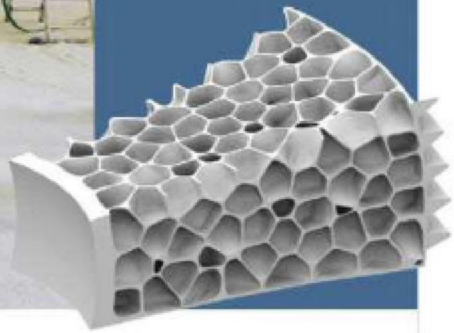
Le projet s'est aussi intéressé au design de la base, confié au cabinet d'architectes britannique Foster + Partners (concepteur du viaduc de Millau et du London City Hall), qui a intégré la double contrainte de protection contre le rayonnement solaire et l'impact d'une micrométéorite. Le cahier des charges stipulait, en effet, que la structure puisse maintenir la dose de radiation à laquelle seraient exposés les résidents en deçà d'un niveau raisonnable pour une durée de six mois à un an, et résister avec une probabilité de 99 % à l'impact d'une micrométéorite sur une durée de dix ans. Ce qui s'est traduit par une épaisseur minimale de 1,5 mètre dans le sens du rayonnement solaire pour la première exigence, et une épaisseur minimale de 800 mm pour la seconde. Le design final respecte ces deux contraintes en faisant varier l'épaisseur entre 1 et 2 mètres, selon l'orientation et la marge de sécurité voulue. *« Nous sommes partis de l'hypothèse qu'une épaisseur de 1,8 mètre serait suffisamment protectrice pour permettre un séjour de deux ans sur place »*, résume Laurent Pambaguian.

Autre défi : prévoir la façon dont l'imprimante pourrait être mise en œuvre sur place pour bâtir un édifice capable d'abriter 4 résidents. *« Outre les buses, la machine telle qu'utilisée sur Terre nécessiterait un gros re-engineering pour pouvoir fonctionner dans le vide. Il y a des points sensibles, comme les parties mobiles, qui seraient sujettes au vieillissement et aux dégâts dus à l'effet combiné de la poussière lunaire, du vide et de la température »*, estime Giovanni Cesaretti. Plutôt que de déployer une énorme imprimante 3D, comme celle de Monolite UK, les ingénieurs de l'ESA ont donc imaginé une méthode plus légère, plus flexible et plus adaptée à l'environnement lunaire, qui s'appuie sur de petits robots autonomes. Se déplaçant sur des

RECORD À BATTRE : 3 JOURS

Le record de durée de présence sur la Lune est détenu par les astronautes américains Eugen Cernan et Harrison Schmitt, de la mission Apollo 17. Onzième et douzième hommes à y avoir posé le pied (et aussi les deux derniers en date), en 1972, ils sont restés sur place presque 75 heures d'affilée, soit un peu plus de trois jours terrestres. Cette durée record leur a permis d'effectuer plusieurs expériences scientifiques (dont des mesures du rayonnement cosmique) et de parcourir près de 35 km à la surface de notre satellite à l'aide d'un rover lunaire. Ils battront aussi les records de récolte d'échantillons (110,40 kg), de durée de sorties extravéhiculaires (21 heures 19 minutes), du nombre d'heures passées en orbite lunaire (147 heures 41 minutes), d'éloignement maximal du module lunaire (7,37 km) et de durée d'une mission spatiale (301 heures 51 minutes).





DES PAROIS ALVÉOLAIRES

Un premier échantillon de paroi extérieure de la base a déjà été imprimé en 3D. Sa structure alvéolaire offre le double avantage de résister au rayonnement cosmique et aux météorites.

chenilles, ces rovers sont équipés d'un racloir pour collecter le régolite et le pousser jusqu'au site de construction, d'un bras articulé accueillant à son extrémité les aiguilles d'injection, et de réservoirs de liant, pour solidifier le régolite une fois en place.

Le scénario concocté par le consortium prévoit ainsi de faire alunir une structure tubulaire, posée dans sa longueur au sol. À son extrémité se déploierait un dôme gonflable de 10 mètres de diamètre au sol pour 5 mètres de hauteur, pouvant accueillir deux niveaux d'habitation, qui servirait de support à l'impression 3D. Les robots pourraient charrier de la poussière jusqu'à la base du dôme gonflable et la solidifier, couche après couche, jusqu'à recouvrir totalement le dôme d'une coque protectrice. La structure gonflable serait ensuite remplacée par une autre, également gonflable, mais légèrement plus petite afin de ne pas être en contact direct avec le régolite. Avantages : réduire le risque de déchirure et assurer une meilleure isolation thermique. L'opération pourrait être répétée, le module tubulaire pouvant être utilisé comme sas d'entrée dans un dôme, ou pour connecter plusieurs dômes entre eux et ainsi agrandir progressivement la base et sa capacité d'accueil.

La structure interne de cette coque a elle aussi été étudiée pour offrir la meilleure protection, tout en minimisant les ressources nécessaires. Ce sera donc une structure alvéolaire, dont les parties rigides contiendront de la poudre non-solidifiée. Une configuration qui présente l'avantage d'assurer la résistance nécessaire en limitant au plus juste les besoins en liant. *« L'impact d'une micrométéorite est à peu près comparable à celui d'un boulet de canon, avec une vitesse d'impact de l'ordre de 18 km par seconde, soit une très grosse quantité d'énergie. L'avantage de cette structure alvéolaire contenant de la poudre non-solidifiée, c'est que l'énergie s'y disperse de façon très efficace »*, explique Laurent Pambaguian.

DES QUESTIONS ENCORE EN SUSPENS

L'équipe est ainsi parvenue à construire sur Terre un bloc de 1,3 tonne simulant ce que pourrait être un échantillon de paroi alvéolaire de base lunaire. Mais de nombreuses questions restent à étudier avant que ce scénario permette enfin d'envisager la colonisation de la Lune. *« Il faut encore analyser quels seraient la taille et la puissance des robots, les besoins en électricité, comment l'eau nécessaire au liant pourrait, elle aussi, être recueillie sur place, comment tout cela pourrait être envoyé sur la Lune… Toutes ces questions restent à étudier en détail »*, admet Laurent Pambaguian, qui se veut tout de même confiant : *« Une telle base n'est pas envisageable d'ici cinq ans. En revanche, si des moyens financiers sont débloqués, il y a de fortes chances pour que ce soit techniquement réalisable d'ici une dizaine d'années. »* Mais de là à habiter sur la Lune, il y a encore un grand pas… ●

Si des moyens financiers sont débloqués, une telle base serait techniquement réalisable d'ici une dizaine d'années

ESA



DÉCOUVRIR LES OCÉANS DE TITAN

Par Román Ikonicoff



LA SONDE *CASSINI* (NASA, ESA, ISA), ENCORE EN VOL

JUSQU'EN 2017

La sonde Cassini *effectue des orbites autour de Titan depuis 2004. Elle continue d'envoyer à la Terre des informations précieuses sur cette lune.*

DEUX APPELS À PROJETS (NASA ET ESA)

À PARTIR DE 2024

La Nasa et l'ESA pourraient lancer, chacune, une mission dont l'objectif est de mieux connaître Titan (cartographie, composition des sols…).

UNE MONTGOLFIÈRE (ESA)

PAS DE DATE FIXÉE

Ce concept, qui attend d'être programmé, permettrait d'étudier la surface et les variations saisonnières de Titan depuis les airs.



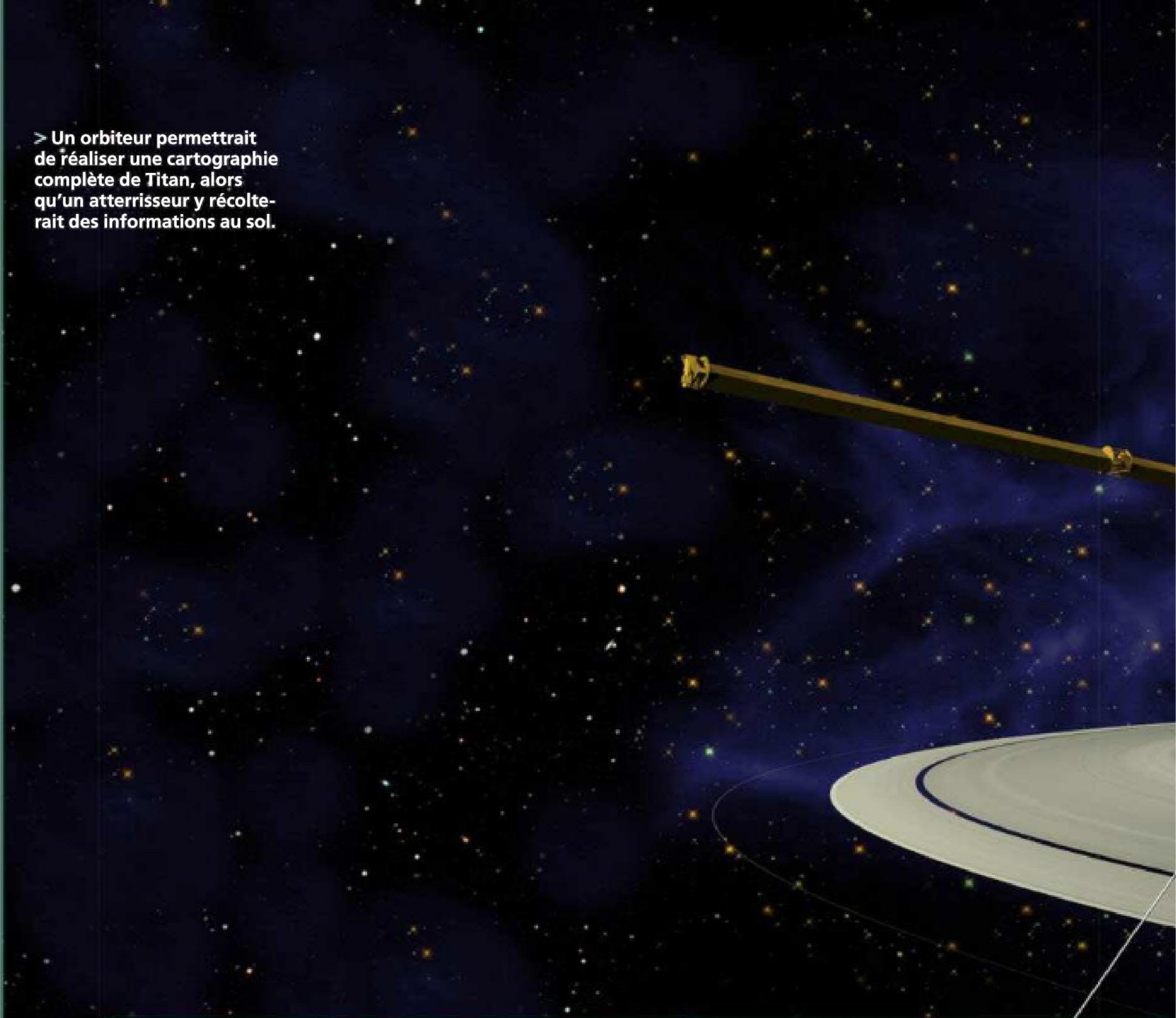
Il y a dix ans encore, les astronomes ignoraient presque tout de Titan, la plus grande lune de Saturne. Tout juste savaient-ils, grâce aux survols lointains des sondes Pioneer 1, en 1979, et Voyager 1, en 1980, qu'elle a une épaisse atmosphère et qu'elle est très froide (–179,5 °C en moyenne !). Mais dans les années 2004-2006, la mission Cassini-Huygens, dédiée à l'étude du système de Saturne, dévoile un astre de tout intérêt : les vols à 950 km d'altitude de Cassini et les observations du module Huygens, qui se pose à sa surface en janvier 2005, révèlent que Titan possède un climat digne de la Terre ! Des saisons, des vents, des nuages, des pluies, des mers… au détail près que le liquide qui y ruisselle est du méthane. Dès lors, Titan figure dans le peloton de tête avec Mars et Europe (lune de Jupiter) des corps du système solaire qui pourraient abriter la vie ! Une vie extraterrestre que la Nasa et l'Agence spatiale européenne (ESA) voudraient découvrir, à l'aide d'une montgolfière et d'un sous-marin…

SSI/JPL-CALTECH/NASA

LE SUB, LE DERNIER PROJET DE LA NIAC (NASA)

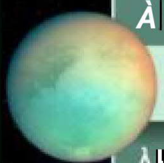
PAS AVANT 2040

Plongé dans l'une des mers de méthane de Titan, un sous-marin étudierait la chimie prébiotique et chercherait des signes de vie…



> Un orbiteur permettrait de réaliser une cartographie complète de Titan, alors qu'un atterrisseur y récolterait des informations au sol.

À PARTIR DE 2024



Y envoyer un orbiteur ou un atterrisseur

À l'heure actuelle, Titan est encore exploré par la mission Cassini-Huygens : si l'atterrisseur Huygens s'est éteint quelques heures après s'être posé au sol, l'orbiteur *Cassini* continuera de le survoler jusqu'en 2017. L'heure n'est donc pas à l'envoi d'une grosse mission vers cet astre lointain, situé à 1,5 milliard de kilomètres de la Terre, soit 3 800 fois la distance Terre-Lune ! En revanche, la Nasa et l'ESA ont lancé, chacune de leur côté, un appel à projets pour une mission moyenne (l'enveloppe budgétaire avoisine 1 milliard de dollars tout compris (lanceur et appareillage scientifique), prévue en 2024 pour la Nasa et en 2029 pour l'ESA. Aussi, l'enthousiasme des spécialistes de Titan est à son comble.
Car, du point de vue scientifique, *« cette lune est un bijou ! »* résume Athéna Coustenis, chercheuse à l'Observatoire de Meudon. Plus grand que Mercure (5 150 km de diamètre), Titan est le seul corps solide du système solaire à partager avec la Terre la caractéristique d'une atmosphère dense (1,5 fois plus que la Terre), le seul à posséder un système climatique digne de celui de la Terre et le seul à contenir du méthane liquide en surface. Qui plus est, sa chimie complexe fait de lui un candidat idéal pour la recherche d'une vie extraterrestre ! Ainsi, toute mission, même modeste, est l'occasion de poursuivre l'exploration initiée par Cassini-Huygens.
Toutefois, *« concevoir une mission moyenne visant un système aussi lointain que celui de Saturne se révèle très compliqué »*, avoue Gabriel Tobie, chercheur au laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes. C'est pourquoi Athéna Coustenis, Gabriel Tobie et de nombreux chercheurs de laboratoires européens et américains ont mis en commun leurs efforts pour répondre aux appels à projets. *« Nous sommes en plein travail de définition, mais*

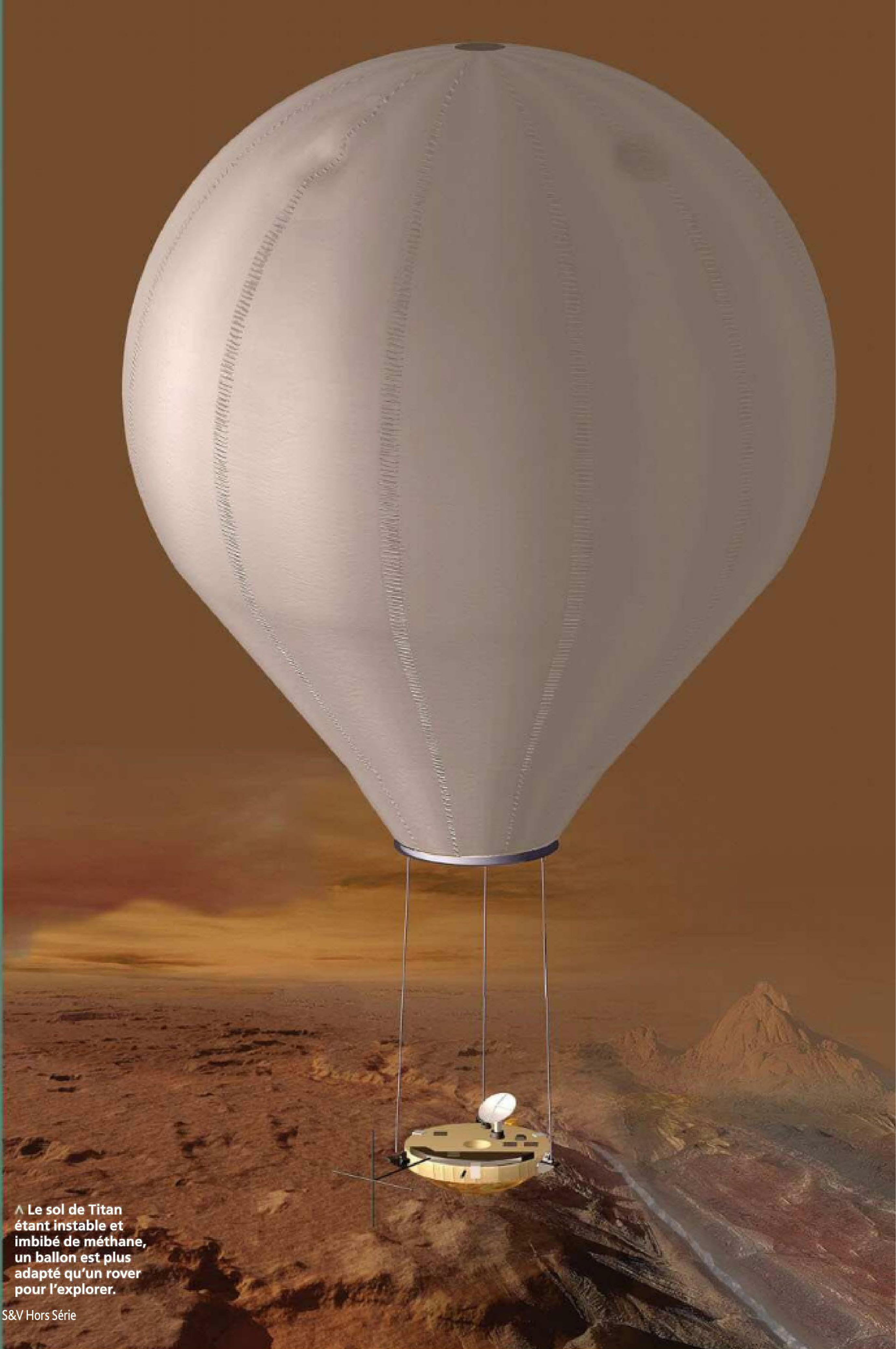


l'on s'oriente résolument vers l'idée d'un orbiteur ou d'un atterrisseur », précise Gabriel Tobie.

DES TECHNOLOGIES SÛRES

En effet, pour ces missions moyennes, les agences veulent des projets peu risqués et favorisent donc les technologies éprouvées. Il ne sera donc pas encore question, cette fois, de montgolfière ni de sous-marin pour Titan, projets qui attendent leur heure (voir pages suivantes). L'idée est plutôt de s'inspirer de la mission Cassini-Huygens pour faire du neuf… avec un budget quatre fois moindre. Alors, orbiteur ou atterrisseur ? *« C'est un énorme dilemme »*, confie Athéna Coustenis. Un orbiteur pourrait embarquer une caméra de très haute définition, un radar, un spectromètre de masse pour l'analyse des molécules atmosphériques, etc. *« Nous pourrions ainsi établir une cartographie complète du satellite, ce que* Cassini *n'a pas fait, et suivre ses cycles saisonniers sur une longue période »*, détaille l'astrophysicienne. Un choix raisonnable. Mais l'option de l'atterrisseur est plus excitante : *« Rien ne remplace une investigation* in situ, ajoute-t-elle. *Huygens nous a révélé que la surface de Titan était trempée de méthane, ce que nous n'aurions jamais pu savoir autrement. »* Face à ce choix difficile, la scientifique esquisse une autre possibilité : *« Et pourquoi pas une mission avec un orbiteur et un atterrisseur peu chargés en instruments ? Une caméra et un spectromètre de masse pour l'un, un analyseur chimique du liquide et une caméra de descente pour l'autre. »* L'équation serait peut-être jouable. Mais paraîtra-t-elle raisonnable aux agences ? En tout cas, si Titan est finalement retenu par l'ESA ou par la Nasa (ou les deux !), le prochain rendez-vous avec cette quasi-planète se fera aux alentours de 2032-2036.

JPL/NASA



∧ Le sol de Titan étant instable et imbibé de méthane, un ballon est plus adapté qu'un rover pour l'explorer.



PAS DE DATE FIXÉE

Y faire circuler une montgolfière

Ce concept était présélectionné en 2009 pour faire partie de la première mission Large du programme Cosmic Vision de l'ESA, à 2,5 milliards de dollars. Nommée Titan Saturn System Mission (TSSM), cette mission comprenait, outre la montgolfière, un orbiteur, ainsi qu'un amerrisseur fourni par la Nasa. TSSM était en compétition avec Jupiter Icy Moon Explorer (Juice), qui fut finalement retenue. Mais tandis que la Nasa semble avoir abandonné la solution de l'amerrisseur pour un projet de sous-marin (voir pages suivantes), *« la montgolfière attend son heure,* se réjouit malgré tout Athéna Coustenis, maître d'œuvre de la mission TSSM. *Nous l'avons surnommée le "rover de Titan", en référence au rover Curiosity de Mars, car le sol de Titan étant imbibé de méthane et instable, la seule manière de se déplacer à sa surface est de le faire par les airs. »*
Ce qui a séduit les décideurs de l'ESA et qui maintient le projet en bonne place pour une future mission ? Sa durée de vie et son principe de propulsion. Largué par une sonde, le ballon a été pensé pour voler pendant six mois terrestres, de quoi observer les variations saisonnières de l'astre. Et l'engin, prévu pour flotter à 10 000 m d'altitude au-dessus de l'équateur, ne requiert aucun système de propulsion : sur cette lune saturnienne dont la dynamique climatique ressemble tant à celle de la Terre, *« le ballon se déplacera naturellement autour de l'équateur sans dévier, poussé par les vents de la zone de convergence intertropicale, telle une montgolfière terrestre portée par un courant-jet,* explique l'astrophysicienne. *Puis le ballon se posera au sol et l'analysera. »*

Dans sa version initiale, la montgolfière devait transporter huit instruments de mesure pour un poids (sur Terre) de 600 kg ! Mais pour la séparer du projet TSSM et pouvoir la proposer pour des missions plus modestes, le concept s'est allégé. Nommé Titan Aerial Explorer (TAE), c'est désormais un ballon scellé en polyester de 4,6 m de diamètre rempli d'hélium et doté de six instruments, pour un poids total de 176 kg. De quoi néanmoins percer le mystère de l'épaisse atmosphère de Titan, sa composition chimique, sa structure thermique et électrique. De quoi également étudier la composition et la structure de sa surface et, surtout, en dresser une cartographie complète incluant ses variations saisonnières.

SAISONS SÈCHE ET HUMIDE

Car depuis les incroyables découvertes de la mission Cassini-Huygens, les scientifiques ont compris que l'atmosphère de Titan ressemble à celle de la Terre avant l'apparition de la vie et la production de l'oxygène par celle-ci, voici 3,8 milliards d'années. Malgré sa température basse (–179,5 °C en moyenne au sol, –190 °C à 10 km d'altitude) et le fait que sa surface est principalement composée de glace d'eau, Titan possède en effet un climat « terrestre » : une alternance de saisons sèche et humide, où le méthane liquide s'abat en des pluies diluviennes, imbibe le sol et forme des mers de la taille des Grands Lacs nord-américains. *« La Terre et Titan sont les deux seules planètes possédant un climat aussi variable et des processus de modification de la surface par le ruissellement et le recyclage du liquide »,* précise Gabriel Tobie, membre de l'équipe TSSM. L'étude de cette atmosphère par TAE renseignerait ainsi sur le climat de la Terre primitive, tout autant qu'elle fournirait de précieuses informations sur des exoplanètes à méthane liquide. *« Bien qu'unique dans le système solaire, Titan est très probablement à l'image d'exoplanètes qui gravitent à des distances de leur étoile favorisant la présence de méthane liquide en surface »,* ajoute le chercheur.
Certes, bien que postulée dans des études scientifiques, l'hypothèse d'un développement de la vie dans du méthane liquide reste spéculative. Mais Titan est considéré comme l'une des meilleures usines à molécules prébiotiques (les briques du vivant) du système solaire, plus encore qu'Europe ou que Ganymède : son atmosphère – 98,4 % d'azote (contre 78,1 % pour la Terre aujourd'hui), de l'hydrogène, du méthane et d'autres molécules en faibles concentrations – interagit avec le méthane du sol grâce à une constante agitation climatique. Seule l'eau lui manquerait… Quoique : plusieurs mesures indirectes ont révélé la présence d'un océan global (recouvrant toute la surface de Titan) d'eau salée enfoui à 50 ou 80 km sous la surface, entre deux couches de glace d'eau. La montgolfière a été conçue pour vérifier cela en cherchant la présence de cryovolcans (volcans froids) rejetant l'eau de cet océan, parmi des candidats déjà décelés par *Cassini*. Reste à déterminer si les molécules prébiotiques de la surface atteignent cet océan intérieur, ce qui nécessiterait de plonger au fond d'une mer de méthane et d'analyser ses sédiments. Mais pour cela, il faudrait un sous-marin…

ESA

PAS AVANT 2040

Déceler des signes de vie sous-marine

En dehors de la Terre, Titan est le seul astre du système solaire à posséder des mers liquides. Pour étudier de près ces milieux exceptionnels, la Nasa a conçu le premier sous-marin spatial, un concentré de technologies.

Cette fois, la prise de risque est autorisée. Elle est même fortement encouragée. Il s'agit d'innover, de créer la prochaine génération d'explorateurs spatiaux. Un type d'initiative pour lequel les Américains ont la Niac! La Nasa Innovative Advanced Concept finance, en effet, des projets osés, dont les plus pertinents deviendront les engins spatiaux du futur. Le dernier projet de la Niac? Un sous-marin pour Titan…

Le Sub, comme le nomment ses concepteurs, mesure 5,9 m de long, 1,1 m de large et 2 m de haut. Revêtu de titane, il abrite une structure en aluminium et matériaux composites pour un poids de 446 kg, à vide, et de quelque 1200 kg, quand il est chargé de ses systèmes de communication et de ses instruments scientifiques (spectromètres de masse, sonars, analyseurs chimiques, caméras…). Autant dire qu'il ne trouverait sa place que dans une mission lourde de type Flagship à la Nasa ou Large à l'ESA! Mais pour l'heure, le Sub ne pèse pas un gramme, car il n'existe que sous forme de simulation numérique dans les serveurs de la Nasa. La phase de prototypage n'intervient qu'à la toute fin du processus, mais cette échéance n'est peut-être plus si lointaine! En effet, la Niac vient de faire passer le Sub à la phase II de développement, celle des choix réalistes. *« Nous avons reçu de nouvelles informations de la sonde* Cassini *sur la composition des mers de Titan et nous devons affiner certains aspects de son design »*, explique Ralph Lorenz, planétologue à l'université Johns-Hopkins et membre de l'équipe des concepteurs du Sub, qui regroupe des astronomes, des ingénieurs astronautiques, des planétologues, et même un spécialiste des sous-marins. Car le Sub est censé plonger dans l'une des trois mers de méthane de Titan, Kraken Mare, pour rendre compte de la chimie prébiotique qui s'y déroule, voire déceler les signes d'une activité biologique…

Plongé dans l'une des trois mers de méthane de Titan, le sous-marin étudiera la chimie prébiotique qui s'y déroule

UNE VIE POSSIBLE DANS LE MÉTHANE?

« Déterminer si une vie basée sur les hydrocarbures est possible sur Titan » est, en effet, l'un des objectifs affichés du projet de la Nasa dans la revue *Cryogenics* d'octobre 2015. Entendez: chercher si une vie peut se développer dans un liquide comme le méthane. Mais cette hypothèse extrême, quoique plausible, ne résume pas tout l'intérêt d'une exploration sous-marine de Titan. Retracer son histoire climatique, confirmer la présence d'un océan global d'eau liquide à 50 ou 80 km sous la surface, détecter des sources internes de chaleur sont autant de points que le Sub devrait permettre d'éclairer. Surtout, il explorerait la possibilité d'une voie mettant en contact les molécules prébiotiques de la surface (mers de méthane inclues) avec cet océan d'eau intérieur. *« Les mers de méthane sont parmi les lieux les plus intéressants de Titan,* résume Athéna

ILLUSTRER.FR



∧ Le Sub ira sonder les profondeurs de Kraken Mare, une mer de méthane, la plus vaste étendue de liquide actuellement identifiée à la surface de Titan. Sa mission : rechercher des signes d'activité biologique et des preuves de l'existence d'un océan souterrain.



S. HOBBS - ATG MEDIALAB./ESA

Coustenis, de l'Observatoire de Meudon. *Tout ce qui vient de l'atmosphère s'y dépose et s'y dissout. En même temps, le fond de mer est un milieu poreux qui pourrait laisser filtrer ce qu'il y a sous la surface. »*

On comprend que l'exploration des mers de Titan soit l'un des rêves des exobiologistes… Mais ce ne sera pas avant 2040 : le projet de Sub est colossal et vise le très long terme. Dans sa dernière version, le sous-marin devrait accomplir un séjour de 90 jours dans Kraken Mare, la plus étendue des trois mers de Titan (400 000 km²), plus grande que la mer Caspienne, avec une profondeur estimée de 160 m. Durant la phase d'immersion (8 heures par jour), ce vaisseau propulsé par quatre hélices devrait progresser à une vitesse de 3,6 km/h, pour parcourir au total 2 000 km : il analyserait la composition et la densité du liquide en fonction de la profondeur, cartographierait les fonds marins et prélèverait des échantillons de sédiments. Dans la phase de « repos » en surface (16 heures par jour), il mesurerait les variations de température, de pression, d'humidité et de vitesse des vents, observerait les phénomènes météo et transmettrait ses informations à la Terre. Sa consommation moyenne s'élèverait à 800 W, ce qui revient en une journée à 20 kWh, l'équivalent de 8 ampoules de 100 W allumées 24h/24. Cela peut sembler modeste, mais pour une mission aussi longue, ça représente beaucoup d'énergie à produire !

Comment, alors, alimenter en électricité les moteurs du sous-marin et les instruments scientifiques ? Malgré la présence massive de méthane et d'éthane liquides dans les mers de Titan (l'équivalent de notre gaz naturel liquéfié), la solution la plus réaliste serait d'embarquer depuis la Terre une source radioactive : deux générateurs Stirling à radio-isotope de 65 kg, qui transforment l'énergie radioactive du plutonium enrichi en électricité et en chaleur. Cette chaleur permettrait aux instruments scientifiques de fonctionner de manière optimale. Inconvénient : en se dissipant à l'extérieur du sous-marin, elle risquerait de mettre en ébullition un méthane à – 181 °C. D'où l'ajout d'un système de contrôle thermique capable de canaliser et de moduler la chaleur produite par les générateurs (quelque 150 °C) à l'aide d'isolants, d'un réseau de conducteurs thermiques et de systèmes de refroidissement. Finalement, au prix d'un alourdissement de 95 kg, le sous-marin disposerait d'un système efficace assurant 20 °C à l'intérieur et ne dépassant pas un différentiel de 1,6 °C entre son enveloppe extérieure et la température du méthane liquide dans lequel il est plongé. Une réussite !

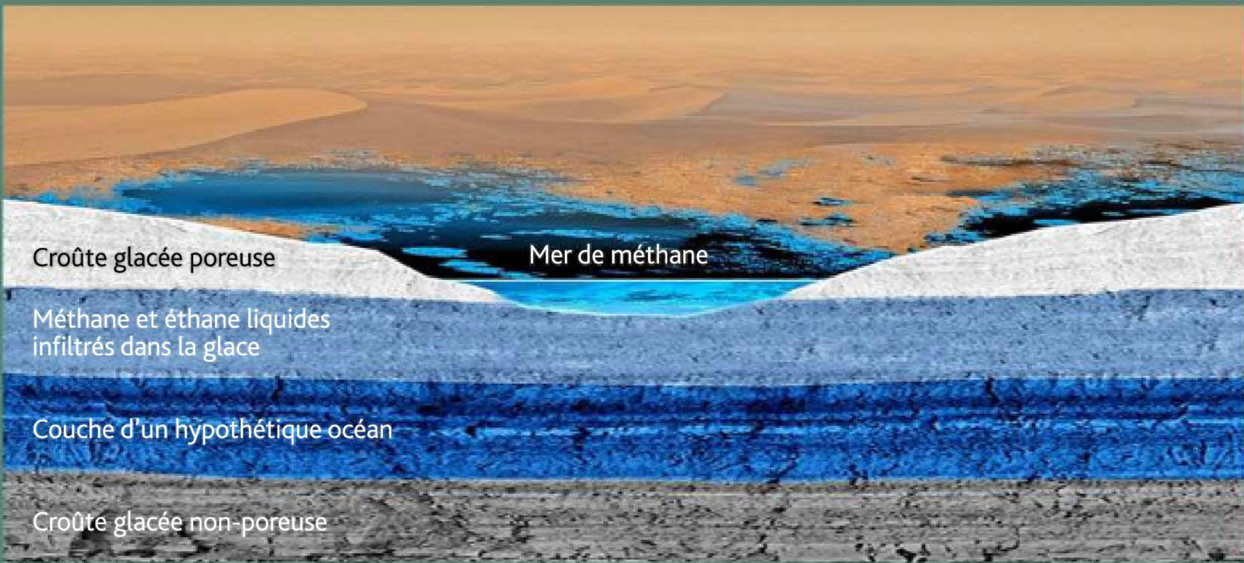
Le Sub étudiera la possibilité d'un contact entre les molécules prébiotiques de la surface et un océan d'eau intérieur

Autre point épineux, la flottabilité. Sur Terre, un sous-marin dispose de plusieurs options pour contrôler son niveau d'immersion : des ailerons orientables, des hélices pivotables ou des ballasts remplis de gaz



UN PAYSAGE LACUSTRE ENCORE PLEIN DE MYSTÈRES…

S'appuyant sur les données collectées par l'atterrisseur Huygens en 2005, les scientifiques pensent que si un océan souterrain d'eau liquide (salée) existait sur Titan, il se trouverait entre les couches poreuses et la couche non-poreuse du sous-sol glacé.



qu'on peut liquéfier ou sublimer selon les besoins. Les concepteurs ont tranché en faveur de ballasts à néon, élément chimique dont la température de liquéfaction-sublimation se situe à −246 °C, bien en deçà de la température du méthane liquide de Titan.

LE PRINCIPE D'ARCHIMÈDE APPLIQUÉ À TITAN

Les ballasts sont deux cylindres situés le long des flancs du Sub, de 4 m de long sur 27 cm de diamètre, contenant chacun 6,25 kg de néon. Quand le sous-marin doit faire surface, du néon liquide est gazéifié par décompression à l'aide de pistons. Quand il doit plonger, l'opération inverse est effectuée : une compression du gaz par pistons qui le liquéfie. L'effet de remontée ou de descente est lié à la célèbre « poussée d'Archimède », qui vaut également sur Titan : dans un liquide (ici, du méthane), la poussée sur un objet (les ballasts) est d'autant plus forte que la densité de l'objet est faible. Ainsi, quand le néon du ballast passe de l'état liquide à l'état gazeux, sa densité diminue, et l'objet tend à remonter, et inversement. Ce système à ballasts, qui revient à avoir des ballons qu'on peut gonfler et dégonfler à souhait, permet de stabiliser finement le Sub.

Reste le plus difficile : amener le sous-marin dans la mer et le téléguider. Côté communications, l'idée d'origine était de doter le sous-marin d'une antenne très puissante placée sur son dos, comme une arête dorsale, permettant de capter les ordres envoyés par la Terre (le programme de la journée) et de retransmettre depuis le Sub vers la Terre les informations recueillies. Cela évitait de surcharger la mission avec un orbiteur-relais. Mais cette solution obligerait la Terre et le Sub à rester sur une ligne de visée directe, en évitant que Saturne ne vienne s'entremettre. Une conjonction particulière qui réduit drastiquement les fenêtres de lancement possibles de la mission. Aussi, les concepteurs hésitent avec l'alternative de placer un orbiteur comme relais de communication : *« La possibilité de faire interagir le Sub avec un orbiteur est justement l'un des thèmes d'étude dans cette phase II qui débute à peine »,* reconnaît Ralph Lorenz.

Quant au Delivery Scenario, soit l'injection du Sub dans la mer, les concepteurs avaient initialement pensé embarquer la machine sur le Darpa X-37B, une petite navette sans équipage en cours de développement. Elle serait, en principe, capable de voler dans l'atmosphère de Titan et d'amerrir en douceur. Mais qui amènerait X-37B au voisinage de Saturne ? Finalement, l'équipe semble s'orienter vers une solution plus classique : un système de descente à réaction avec parachutes et amortisseurs gonflables. Mais rien n'est tranché… ●

S'APPROPRIER LES ASTÉROÏDES



Par Alexandra Pihen



HAYABUSA 2 (JAPON) ET OSIRIS-REX (NASA)

JUSQU'EN 2023

Ces deux missions indépendantes tenteront chacune de ramener des échantillons d'un géocroiseur, afin de mieux en connaître la composition.

MISSION NEOCAM (NASA)

À PARTIR DE 2021

Il s'agit de lancer un télescope spatial infrarouge capable de repérer les astéroïdes géocroiseurs d'un diamètre inférieur à 140 m.

MISSION AIDA (NASA ET ESA)

2020-2022

Objectifs : le géocroiseur Didymos et sa lune Didymoon. Alors qu'une sonde s'écrasera sur Didymoon, une seconde mesurera l'effet du choc sur son orbite.



Vestiges errants de la naissance du système solaire, les astéroïdes sont de véritables trésors. Car c'est dans la nébuleuse primitive, il y a 4,5 milliards d'années, que des poussières se sont regroupées pour leur donner naissance. Certains se sont agglomérés pour former les planètes telluriques, Mercure, Vénus, la Terre et Mars. D'autres sont restés à l'état de briques, formant les groupements d'astéroïdes qui orbitent surtout dans la ceinture principale, entre Mars et Jupiter, et dans la ceinture de Kuiper et le nuage de Oort, au-delà de Neptune. Mieux connaître ces rochers permettrait donc de percer les secrets de notre histoire. En outre, ce sont de potentielles ressources minières. Plusieurs missions ont pour but d'en ramener des échantillons, voire de capturer un astéroïde entier ! Mais attention : certains d'entre eux, les géocroiseurs, menacent de heurter la Terre, au risque de dégâts extrêmes. Des missions traquent les plus dangereux, dans l'espoir de dévier leur trajectoire.

JAXA - ESA - NASA

MISSION ARM (NASA)

2021-2026

Cette mission américaine prévoit de collecter un rocher sur un géocroiseur et de le mettre en orbite lunaire, pour en faciliter l'étude.

PLANETARY RESOURCES ET DEEP SPACE INDUSTRIES

PAS AVANT 2025

Ces deux sociétés américaines ont comme objectif l'exploitation minière des astéroïdes. Mais elles en sont encore à identifier les cibles potentielles.



V Grâce aux échantillons qui seront prélevés sur deux astéroïdes carbonés, les scientifiques espèrent connaître la composition précise de ces corps primitifs.



2016-2023

Mieux les connaître

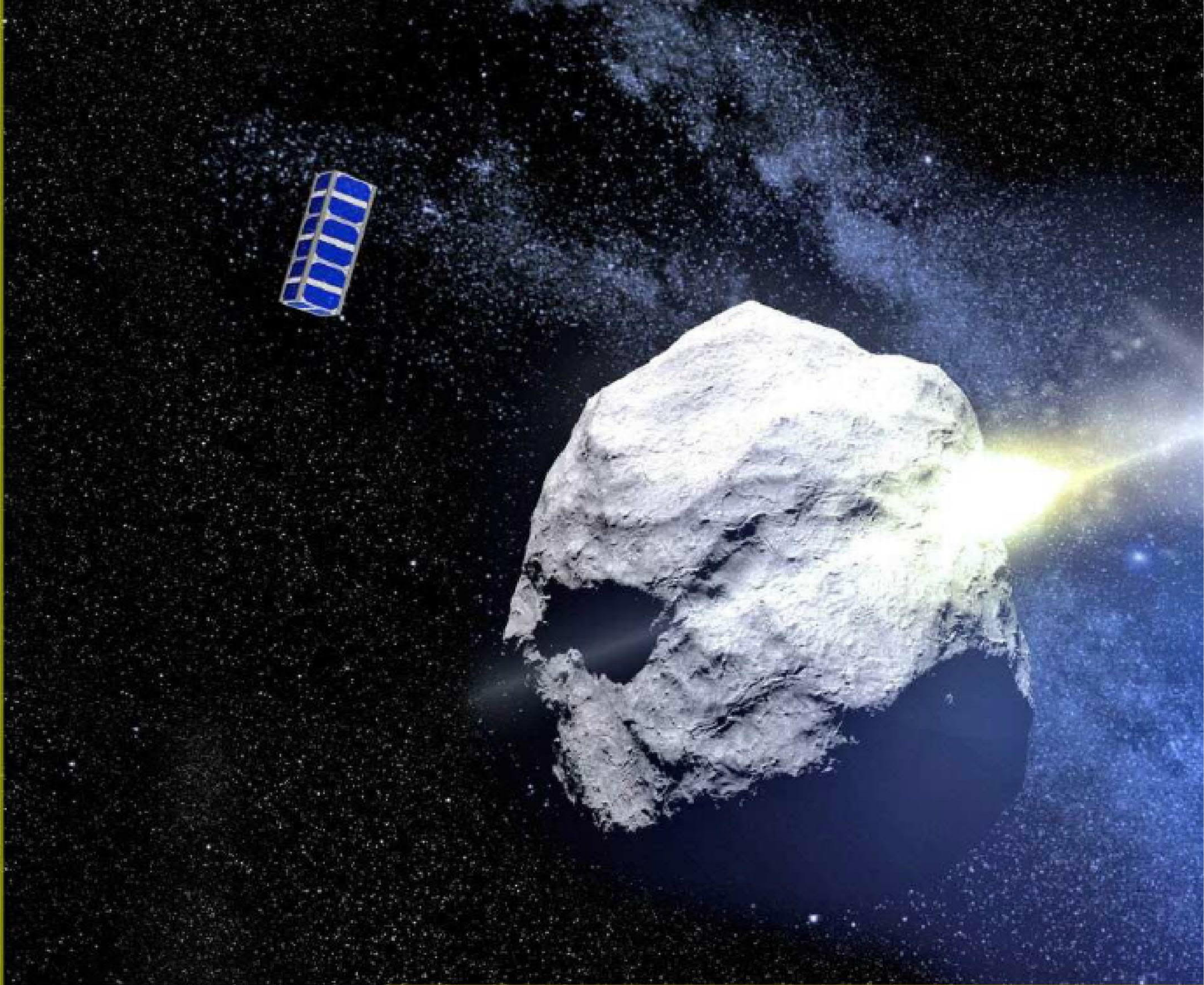
Tenter de collecter des échantillons d'astéroïdes et les ramener sur Terre est le but principal des deux missions indépendantes Hayabusa 2 (de l'agence spatiale japonaise Jaxa) et Osiris-Rex (Nasa), qui rejoindront chacune leur astéroïde cible en 2018, à quatre mois d'intervalle. *« Ces missions de retours d'échantillons sont cruciales, car la composition exacte des astéroïdes nous échappe. D'une part, les observations depuis la Terre restent imprécises. D'autre part, nous ne sommes pas sûrs que la composition des météorites sur Terre soit représentative de celle des astéroïdes »*, souligne Patrick Michel, astrophysicien. En effet, la vitesse de rentrée dans l'atmosphère (plusieurs dizaines de milliers de km/h) désintègre les astéroïdes les plus fragiles ou n'en laisse passer que le matériau le plus résistant. Ainsi, seules 5 % des météorites échouées sur Terre sont carbonées. Or, dans l'espace, 75 % des astéroïdes le sont. Appelés primitifs, ce sont ceux dont la composition est sans doute la plus fidèle aux ingrédients initiaux du système solaire, et qui intéressent le plus les scientifiques.

Quatre ans après *Hayabusa 1,* qui avait rapporté 1543 particules de 3 à 40 micromètres prélevées sur Itokawa, les Japonais réitèrent l'aventure avec *Hayabusa 2,* lancée en décembre 2014 vers le géocroiseur (un astéroïde dont l'orbite croise périodiquement celle de la Terre) Ryugu. Un an et demi d'observations en orbite autour de cet astéroïde carboné de 870 m de diamètre, couplées à des observations au sol (à l'aide d'un atterrisseur et de trois minirovers de 10 cm de long) permettra de le cartographier et d'en définir ses propriétés physiques et chimiques. Puis il s'agira de récolter des échantillons. En surface d'abord, *via* une colonne rétractable posée sur le sol qui collectera les débris obtenus (environ 1 mg de petites poussières) après projection d'une bille de 10 g à 300 m/s. Puis en profondeur, à l'aide du même système, mais en ayant au préalable découvert le sol profond grâce à un impacteur : largué par la sonde, il projettera une masse de 2 kg en cuivre pour former un cratère artificiel. La capsule renfermant la précieuse récolte sera séparée de la sonde aux abords de la Terre pour un atterrissage prévu en Australie en 2020. La sonde, de son côté, échouera en orbite autour du Soleil.

RÉCOLTER PLUS DE MATÉRIAU

Côté américain, le départ d'Osiris-Rex est prévu pour septembre 2016.
Sa cible, Bennu, est un géocroiseur carboné très poreux de 300 m de diamètre, dont la densité est à peine supérieure à celle de l'eau, soit 1,2.
Le travail de caractérisation sera similaire à celui effectué sur Ryugu, mais aucune observation au sol n'est cette fois prévue. En revanche, l'objectif de récolte est plus ambitieux : entre 60 g et 2 kg, selon la structure du matériau de surface. La technique d'extraction sera différente : un bras articulé rétractable de 3,2 m mettra en contact avec la surface un large cylindre cerclé d'une grille à son extrémité. De l'azote sous pression sera alors expulsé, soufflant la matière dans des cavités latérales du cylindre, tandis que le gaz s'échappera par la grille. L'opération, renouvelable deux fois, ne durera pas plus de 5 secondes. Le retour de la sonde est prévu en 2023.
« Les propriétés de la matière organique contenue dans les astéroïdes carbonés nous sont inconnues, avoue Patrick Michel. *Grâce à ces missions, nous aurons l'échantillon et son contexte géologique. Outre l'étude de la naissance du système solaire, nous pourrons vérifier si les astéroïdes, tout en ayant apporté l'eau, pourraient avoir contribué à l'apport des éléments prébiotiques qui ont permis l'émergence de la vie sur Terre. »* Ce sont donc les secrets de nos origines qui sont ici en jeu !

FOTOLIA - JAXA - SHUTTERSTOCK

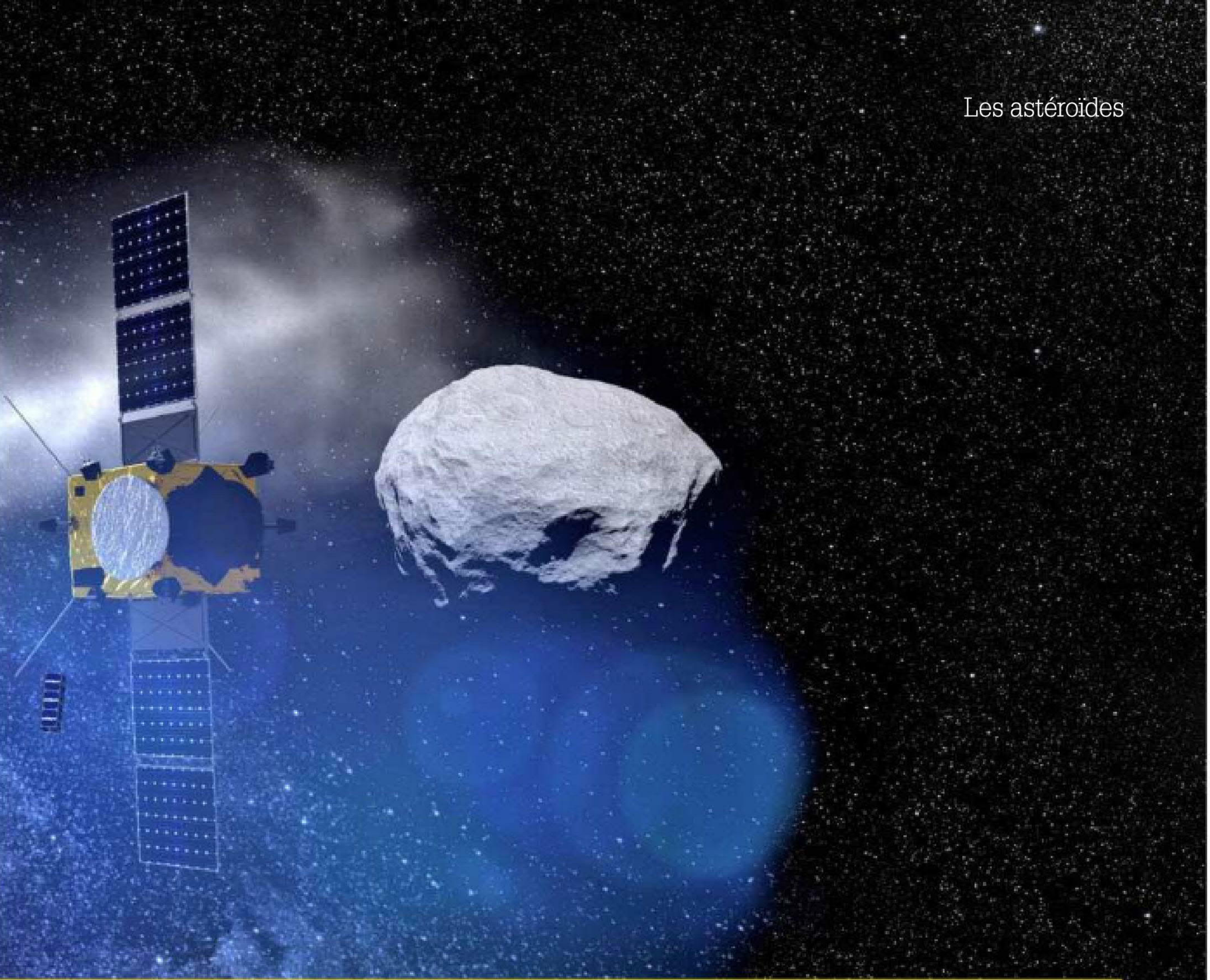


∧ **En 2022, la sonde *Dart* percutera l'astéroïde Didymoon. Un choc qui devrait modifier sa trajectoire.**

2020-2025

Éviter qu'ils nous tombent sur la tête

« Il existe des probabilités non-nulles d'impacts d'astéroïdes avec la Terre dans les 100 prochaines années », affirme David Bancelin, astronome à l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE). Si la majorité des astéroïdes sont situés dans la ceinture principale et ne nous menacent pas, les orbites de certains ont évolué en quelques millions d'années pour atteindre des régions plus basses. Jusqu'à se retrouver sur des orbites non plus sphériques, mais elliptiques, qui croisent périodiquement celle de la Terre, au risque de s'y écraser… Or, si l'impact d'un objet de plus de 2 km de diamètre provoquerait l'extinction massive des espèces sur Terre, à l'image des dinosaures il y a 65 millions d'années, celui d'un astéroïde de diamètre compris entre 70 et 150 m détruirait déjà des zones de la taille de New York ! Appelés géocroiseurs, ces astéroïdes sont une aubaine pour les scientifiques. Mais en raison de leur proximité, ils sont aussi une menace prise très au sérieux. Porté par la Nasa, le Near Earth Object Program recense les géocroiseurs connus et leurs futurs passages à proximité de la Terre. Sont considérés comme dangereux ceux dont la distance minimale à l'orbite terrestre est inférieure à 19,5 distances Terre-Lune et dont le diamètre est d'au moins 140 m. *« Sur les 14 000 géocroiseurs identifiés, environ 10 % sont potentiellement dangereux et 0,001 %, d'un diamètre supérieur à 1 km, sont potentiellement catastrophiques »*, souligne David Bancelin. Les mo-

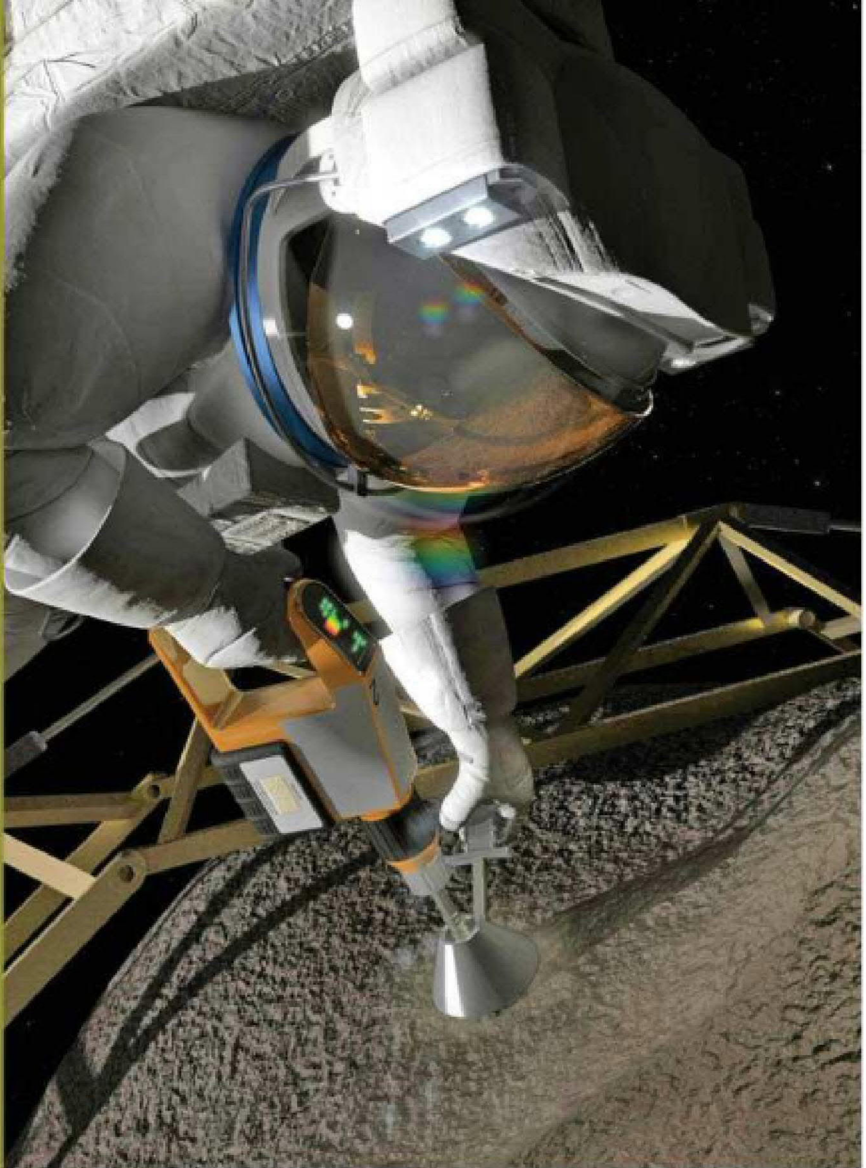


dèles permettent d'estimer que plus de 90 % des plus gros géocroiseurs (de diamètre supérieur à 1 km) sont connus. En revanche, seuls 20 % des plus petits sont recensés.

DÉVIER PLUTÔT QUE DÉTRUIRE

Sous réserve de son acceptation par la Nasa, le *Near Earth Object Camera* (*NeoCam*), télescope spatial infrarouge doté d'un capteur optimisé pour détecter la faible chaleur émise par les astéroïdes, traquera les géocroiseurs de moins de 140 m. Trois solutions d'évitement sont actuellement privilégiées. L'impacteur cinétique sera testé pour la première fois sur un géocroiseur binaire, Didymos (800 m de diamètre) et sa lune Didymoon (170 m), au cours de la mission Aida (Asteroid Impact & Deflection Assessment), sous réserve de sa validation fin 2016. C'est Didymoon qui est visée : les 300 kg de la sonde américaine *Dart* la percuteront à une vitesse de 6,25 km/s. La sonde européenne *AIM*, elle, aura pour tâche de comparer la structure et l'orbite de Didymoon avant et après l'impact. Réalisées conjointement par la Nasa et l'ESA, les sondes seront à 16 millions de kilomètres de la Terre en 2022, aux abords de Didymos. Si le test est concluant, cette méthode servira à dévier les géocroiseurs inférieurs à 500 m de diamètre et repérés au minimum quinze ans avant l'impact (temps de préparation de la mission, du voyage vers l'astéroïde et de sa déviation) ou de diamètre inférieur à 2 ou 3 km, mais repérés cent ans avant ! Solution « douce », le tracteur gravitationnel consiste, lui, à disposer une sonde très massive sur une orbite proche de l'astéroïde, puis à laisser agir la gravitation pour le dévier, sur le principe de l'action et de la réaction. Enfin, la solution de l'explosion nucléaire, destinée à détruire un astéroïde ou à créer un souffle à sa proximité pour le dévier, ne serait envisagée qu'en ultime recours. Tous les moyens sont donc déployés pour que le ciel ne nous tombe pas sur la tête. Car, pour la première fois, le 6 février dernier, la chute d'une météorite a peut-être tué un homme en Inde. Et, en février 2013, c'est plus d'un millier de blessés qu'a causé en Russie la chute d'un tel objet. Preuves que les astéroïdes sont bel et bien un danger....

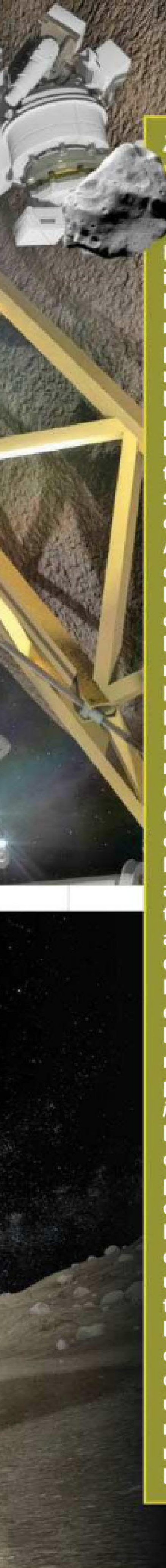
ESA







/\> Une fois placé en orbite lunaire par une sonde, le rocher prélevé sur l'astéroïde 2008 EV5 pourra être étudié dans l'espace par les astronautes.



2021-2026

Les capturer et les transporter

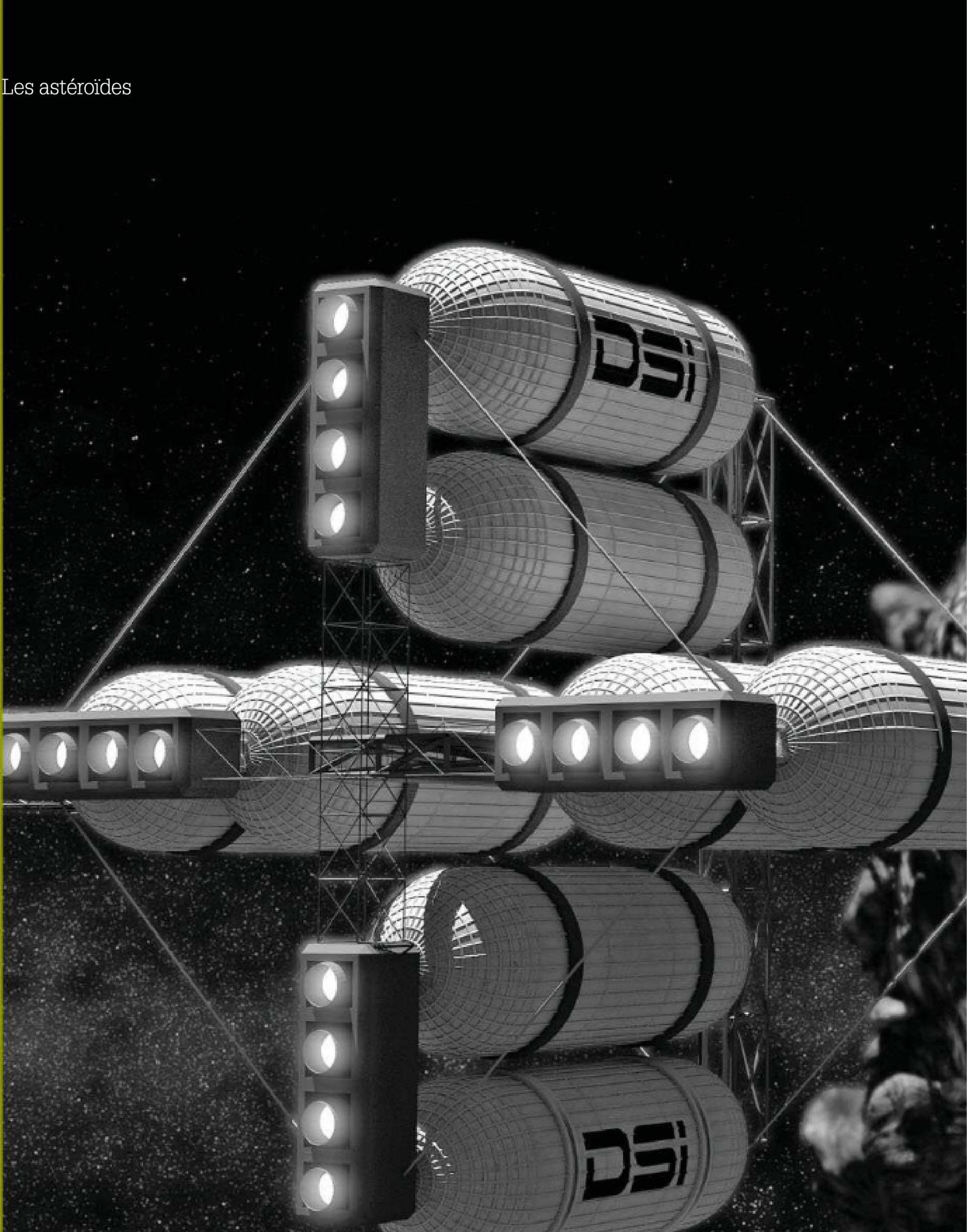
Malgré la valeur scientifique inestimable des astéroïdes, les missions futures ne pourront rapporter que quelques précieuses poussières… Alors pourquoi ne pas capturer tout ou partie de l'un d'eux, le transporter au plus près de la Terre et pouvoir ainsi l'étudier sous toutes ses coutures ! Totalement fou ? La Nasa se lance pourtant dans des projets de ce type avec la mission Asteroid Redirect Mission (ARM), qui sera lancée en 2020 si le financement de 2,5 milliards de dollars est accepté, ou encore l'étude de la propulsion autonome d'un astéroïde, baptisée Reconstituting Asteroids into Mechanical Automata (Rama). Pour comprendre, un petit historique s'impose. En 2010, Barack Obama annule le programme Constellation dédié au retour des Américains sur la Lune. La Maison-Blanche donne alors son accord à la Nasa pour la fabrication du vaisseau *Orion*, devant accueillir quatre astronautes, et d'un gros lanceur, le Space Launch System (SLS). Mais en lieu et place de la Lune, elle demande l'envoi d'un homme sur un astéroïde et son retour en six mois pour 2025 ! Outre l'étude inédite *in situ* d'un astéroïde par l'homme, l'idée est de déployer un véhicule de propulsion de haute puissance, préalable obligé au transport du fret pour la conquête de Mars. La solution proposée par la Nasa est étonnante : aller chercher un astéroïde *via* une mission automatique et le mettre en orbite lunaire pour y envoyer ensuite des hommes. Une façon de délocaliser la mission et d'offrir un accès direct à l'ensemble des matériaux présents sur l'astéroïde, en réduisant fortement les dépenses de carburant !

La première proposition de la Nasa consistait à capturer un petit astéroïde de 7 m de diamètre. Trop ambitieux ! *« C'est un problème de mécanique céleste. Imaginons qu'un petit corps de 7 m soit repéré : il faudra attendre au minimum sept ans avant qu'il repasse au même endroit du fait de la période synodique* [le temps mis par l'astre pour revenir à la même configuration Terre-astre-Soleil], expose Patrick Michel, rapporteur du projet pour la Nasa. *Sachant qu'il est également probable que l'astéroïde ait peu de cohésion et qu'il se délite totalement lorsqu'on essayera de le capturer… »*

MARS EN LIGNE DE MIRE

Dans son dernier rapport, la Nasa présente une solution plus réaliste. Plutôt que l'astéroïde entier, c'est un rocher de sa surface qui sera prélevé. L'heureux élu est un géocroiseur carboné potentiellement menaçant, le 2008 EV5, de 400 m de diamètre, situé à environ 1,04 fois la distance Terre-Soleil aux fenêtres de lancement prévues. Intitulé ARM, le programme est organisé en deux étapes successives. L'Asteroid Redirect Robotic Mission (ARRM) prévoit l'envoi d'une sonde automatique fin 2021 pour collecter à la surface de l'astéroïde, au moyen de grosses pinces métalliques, le rocher de 20 t mesurant 2 à 3 m de diamètre. Petit plus : c'est à l'issue de cette opération que la sonde, munie de sa récolte, testera la technique du « tracteur gravitationnel » et tentera de dévier pendant environ un an la trajectoire de l'astéroïde. Munie de son bloc précieux, elle rejoindra ensuite la Lune en 2025 pour attendre en orbite la seconde phase du programme, l'Asteroid Redirect Crewed Mission (ARCM), prévue fin 2026. L'ARCM permettra l'inauguration de la navette spatiale *Orion* pour rejoindre le rocher astéroïdal, sur lequel les astronautes étudieront et collecteront des échantillons en sorties extra-véhiculaires. Le programme ARM est limpide, mais semé d'incertitudes. Notamment sur le fait de trouver une roche susceptible d'être prélevée à la surface de l'astéroïde. Une interrogation qui ne sera réellement levée qu'une fois sur place. *« Il est probable que des rochers seront présents. Mais d'autres arguments laissent craindre des forces de cohésion en surface insuffisantes pour éviter l'effritement du bloc »,* estime Patrick Michel. Autre défi de taille : développer la puissance nécessaire à la sonde pour transporter 20 t jusqu'à la Lune ! L'objectif principal de la Nasa est d'ailleurs de créer un véhicule de propulsion solaire-électrique de haute puissance (SEP), et de démontrer qu'il peut déplacer de grandes masses tout en fonctionnant pendant de nombreuses années dans l'espace interplanétaire. Un objectif qui reste au premier plan dans l'étude encore plus ambitieuse lancée par la Nasa début juin 2016 : envoyer un petit robot muni d'une imprimante 3D sur un astéroïde afin de concevoir *in situ* un propulseur autonome grâce aux ressources présentes en surface ! *« Pour les États-Unis, la finalité de ces projets est d'acquérir les technologies nécessaires aux longs vols habités,* précise Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Cnes. *Le mot-clé, c'est* pathway *: trouver le bon chemin vers Mars. »* Un chemin dont le prochain jalon sera certainement 2008 EV5.

NASA



^ **Selon les industriels, tirer parti des astéroïdes est une nécessité face au tarissement des minerais terrestres.**



DEEP SPACE INDUSTRIES

PAS AVANT 2025

En exploiter les ressources minières

Pour y trouver des métaux se raréfiant sur Terre, ou de quoi fabriquer du carburant destiné aux missions au long cours, les astéroïdes seront au cœur des futures explorations spatiales.

Fer, or, platine, titane, cobalt, nickel, aluminium et autres minerais rares… À écouter les scientifiques, tous ces éléments sommeilleraient dans les astéroïdes, briques élémentaires de la constitution des planètes telluriques. Or ces ressources, indispensables aux industriels, s'amenuisent sur Terre. Au rythme actuel de production, les réserves en or, argent, palladium, plomb, zinc, étain et platine seraient épuisées d'ici moins de vingt ans, celles de nickel et de cuivre, d'ici quarante ans, et de fer, d'ici quatre-vingts ans ! Voilà pourquoi, depuis 2010, des hommes d'affaires s'affichent en futurs mineurs de l'espace et projettent d'exploiter ces pépites volantes. Un astéroïde carboné contiendrait potentiellement 30 % de silicium, 30 % de fer et d'autres métaux rares. Un métallique renfermerait, entre autres, 90 % de fer et 8 % de nickel. Les astéroïdes sont donc de véritables mines…

Mais pas vraiment à ciel ouvert ! Pour pouvoir extraire une quantité non-négligeable, et donc valorisable, de métaux précieux, il faut disposer d'énormément de matière. *« À titre d'exemple, la mission Osiris-Rex de la Nasa a pour objectif de ramener 60 g d'échantillons d'astéroïde en 2023, pour un coût d'environ 1 milliard de dollars. C'est sans prix pour la connaissance scientifique, mais ça fait cher pour du business ! »* ironise Patrick Michel, responsable scientifique de la partie européenne de la mission Aida. Car, en l'absence de gravité, forer une roche relève de la haute voltige ! Il est donc tout aussi impensable de prélever des tonnes de matière que de les rapporter à bord d'une capsule. Ces opérations nécessitent des technologies dont nous ne disposons pas pour l'instant. Sans même parler du retour dans l'atmosphère, similaire à une mission Apollo, requérant des parachutes gigantesques et donc des budgets colossaux. La rentabilité d'une telle opération souffre de quelques failles…

Par ailleurs, la composition même des astéroïdes, pivot incontournable d'une exploitation minière rentable, demeure incertaine. *« Nous savons que certains astéroïdes sont carbonés (type C), d'autres silicatés (type S) ou encore métalliques (type M). Si la plupart des astéroïdes ont des matières qui peuvent être potentiellement intéressantes, nous avons une connaissance quasi nulle de ce qu'ils contiennent en totalité*, avoue Patrick Michel. *Chris Lewicki* [président et ingénieur en chef de Planetary Resources, une des premières sociétés américaines à s'être lancée dans l'aventure de l'exploitation minière des astéroïdes en 2010, et ancien directeur de vol des sondes martiennes *Spirit* et *Opportunity* à la Nasa] *a beau vendre le projet comme un businessman, il est bien conscient des difficultés. »*

Qu'à cela ne tienne, la chasse aux pépites volantes a pris une autre orientation : se servir des astéroïdes comme stations-service pour les missions longue durée. Il ne s'agit plus d'exploiter leurs ressources pour les valoriser sur Terre, mais de les utiliser *in situ* pour les voyages interplanétaires !

EXTRAIRE LE MÉTAL, MAIS AUSSI L'EAU

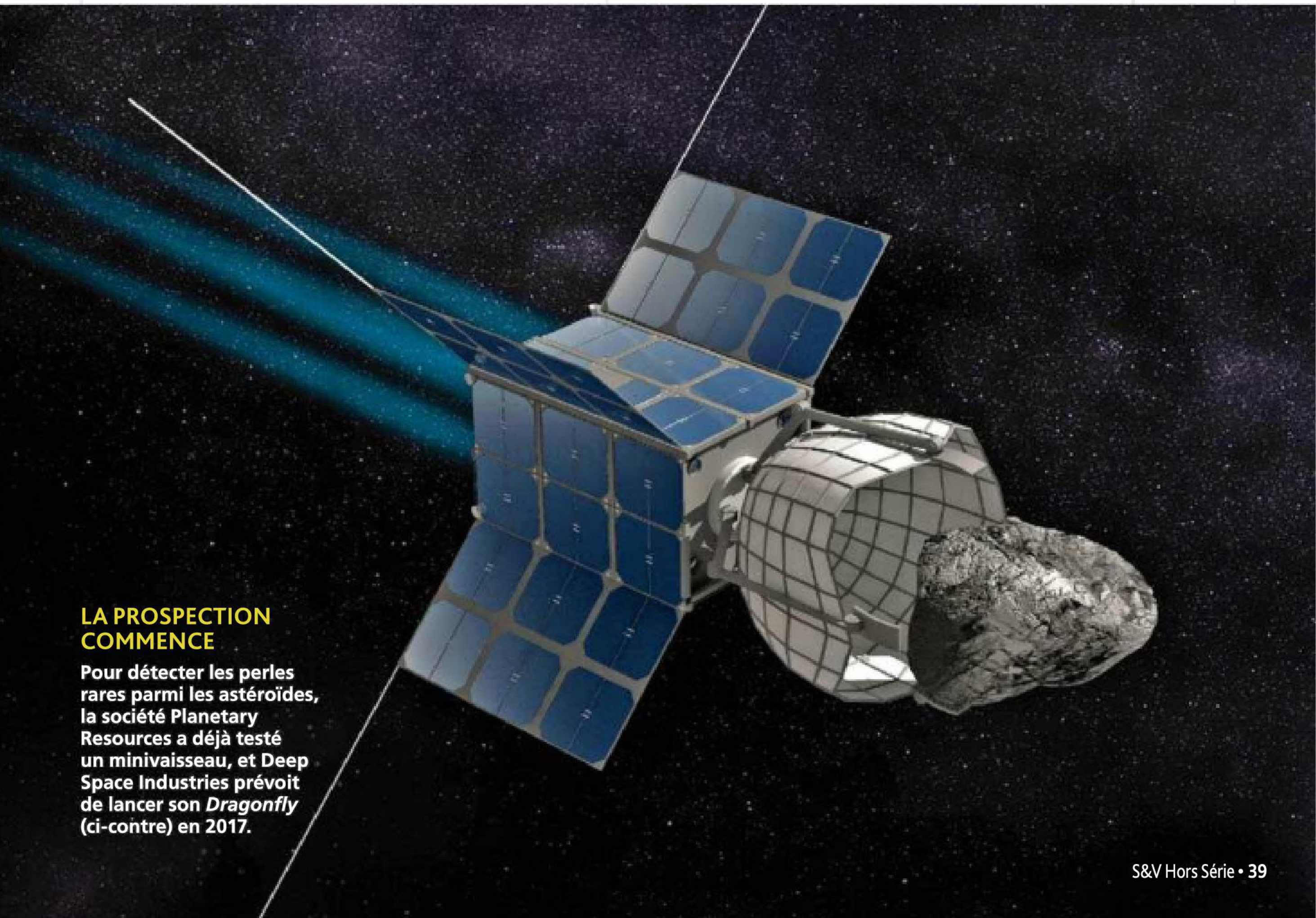
Car depuis peu, une autre ressource, précieuse mais bien moins rare sur Terre, rivalise avec les métaux : l'eau. *« Nos missions de prospection visent en premier lieu les astéroïdes carbonés, susceptibles de contenir de l'eau, une source idéale pour le carburant des fusées »*, proclame le site de Planetary Resources. En effet, l'étude des météorites a prouvé la présence de petites sphères de glace logées dans la roche, appelées chondres. Les astéroïdes carbonés pourraient ainsi renfermer en moyenne 10 % d'eau. Or extraire l'eau d'un astéroïde est beaucoup plus simple que d'en extraire le métal. *« Il suffit de chauffer la surface pour permettre l'évaporation de l'eau. Il faut ensuite la condenser, puis la stocker dans un réservoir. Après, vous pouvez transformer cette eau en hydrogène et en oxygène liquides par hydrolyse et, effectivement, ça vous fait du carburant pour les moteurs de fusée »*, assure Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Cnes.

Transformée en hydrogène et en oxygène liquides par hydrolyse, l'eau donne du carburant pour les moteurs de fusée

Et si les minerais intéressent toujours les entrepreneurs, il n'est dorénavant plus question de les ramener sur Terre, mais de les exploiter directement sur place, là aussi au service de la conquête spatiale. *« Nous ciblons, à plus long terme, les astéroïdes métalliques, afin d'utiliser leurs ressources telles que le fer, le nickel et le cobalt pour construire des structures dans l'espace grâce à l'impression 3D »*, stipule Planetary Resources. *« Mais la station-service doit tout de même se trouver au bon endroit ! »* prévient Francis Rocard. Détecter la perle rare reste donc l'objectif de départ des

DEEP SPACE INDUSTRIES





LA PROSPECTION COMMENCE

Pour détecter les perles rares parmi les astéroïdes, la société Planetary Resources a déjà testé un minivaisseau, et Deep Space Industries prévoit de lancer son *Dragonfly* (ci-contre) en 2017.

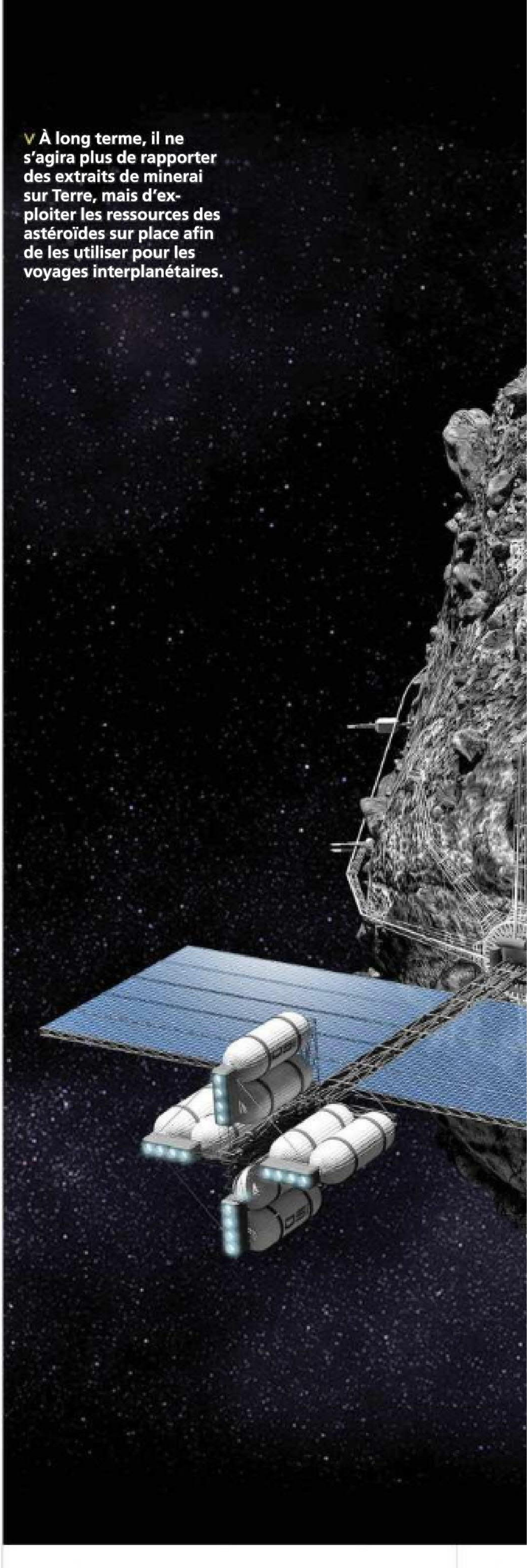
investisseurs qui ont défini leurs critères de choix de l'astéroïde « parfait ». Il doit avoir un delta-v minimum, c'est-à-dire nécessiter le moins d'énergie possible pour être rejoint, ne pas tourner trop vite sur lui-même, être carboné (présence d'eau), d'environ 300 m et, enfin, avoir une orbite peu inclinée par rapport à celle de la Terre (plus facile à rejoindre) et qui la croise fréquemment. Des critères qui rejoignent ceux fixés par les agences spatiales. Rien d'étonnant donc de retrouver comme cible potentielle l'astéroïde visé par la mission japonaise de retour d'échantillons Hayabusa 2 : Ryugu.

UNE FLOTTE DE DRONES SPATIAUX

En parallèle, Planetary Resources développe un minivaisseau de prospection susceptible d'enrichir la liste des perles rares. Son démonstrateur, l'*Arkyd 3 Reflight* (30 cm de long sur 10 cm de haut pour 15 kg), a été déployé à partir de la Station spatiale internationale sur une orbite basse de la Terre en juillet 2015. L'objectif est de tester sa capacité à envoyer des données. Prévu pour un lancement fin 2016, l'*Arkyd 6* devrait intégrer un capteur d'imagerie infrarouge, pour mesurer avec précision les différences de température des objets. L'idée étant, à terme, de déployer autour de la Terre une dizaine de ces drones spatiaux, équipés d'instruments leur permettant de repérer les cibles potentielles et de recueillir des informations sur leur composition, et capables de transférer ces données sur Terre.

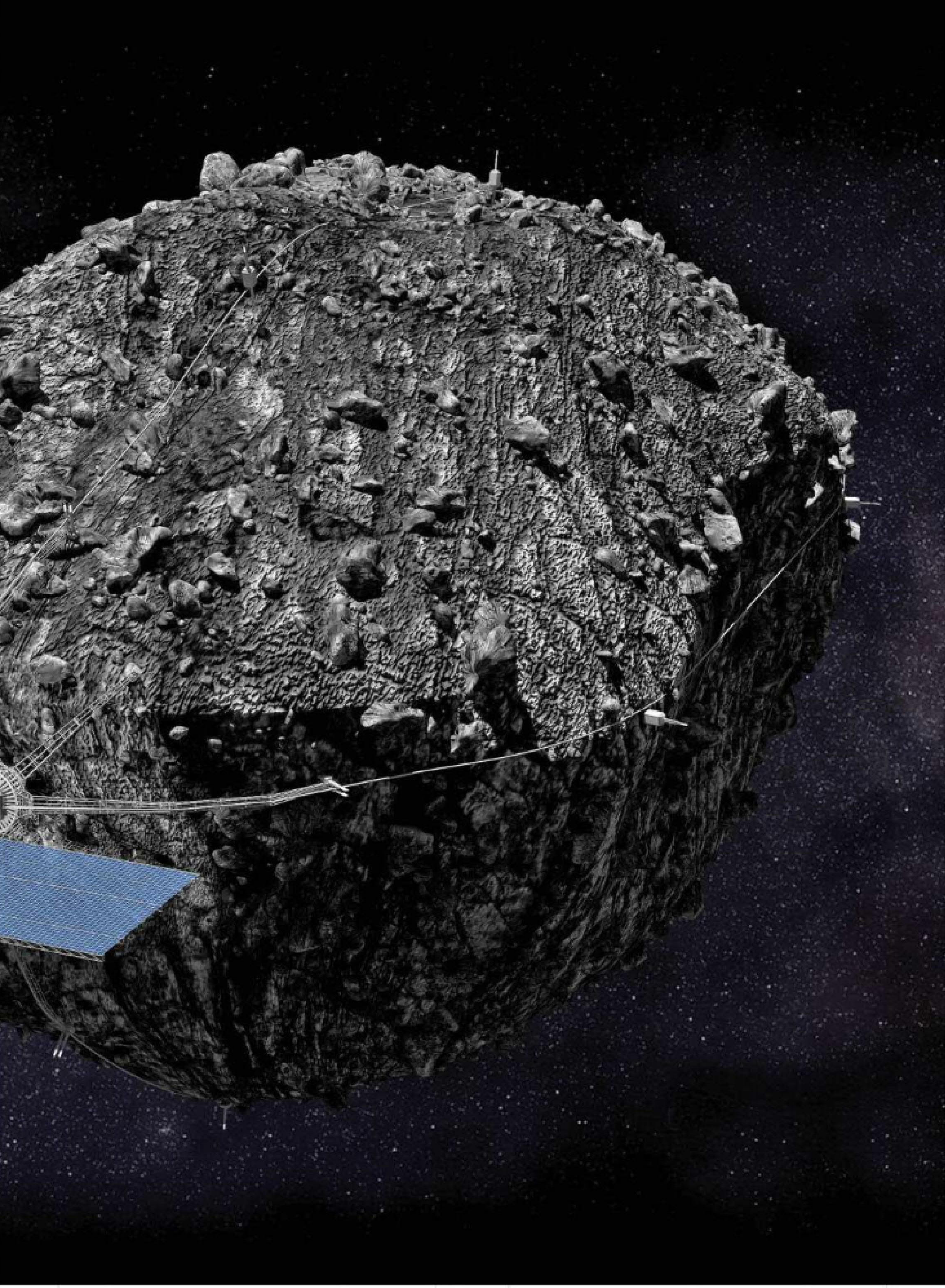
Planetary Resources n'est pas la seule société à faire des plans sur l'astéroïde. Une autre société américaine, Deep Space Industries, poursuit des objectifs similaires et prévoit le lancement de son vaisseau de prospection, le *Dragonfly*, en 2017. *« Nous ne sommes pas dans de la science-fiction, mais j'estime qu'il faudra encore au moins un siècle avant d'arriver à faire des missions robustes permettant l'exploitation des astéroïdes. Tout va tellement vite que je veux bien croire que ça ira plus vite qu'on ne le pense… Mais tout de même pas à la vitesse de la lumière ! »* estime Patrick Michel.

Si les scientifiques observent l'évolution de cette chasse à l'astéroïde, certains États encouragent déjà leur exploitation. Les États-Unis ont voté une loi reconnaissant le droit pour les citoyens américains d'être propriétaires des ressources récoltées sur les astéroïdes, et le Luxembourg a annoncé en 2016 un projet gouvernemental visant à soutenir l'exploitation des ressources minières présentes dans les astéroïdes et sur la Lune. Les richesses des astéroïdes en font rêver plus d'un… ●



V À long terme, il ne s'agira plus de rapporter des extraits de minerai sur Terre, mais d'exploiter les ressources des astéroïdes sur place afin de les utiliser pour les voyages interplanétaires.

DEEP SPACE INDUSTRIES





ÉTABLIR UNE COLONIE SUR MARS

PAR EMMANUEL MONNIER



EXOMARS (ESA/ROSCOSMOS) ET MARS 2020 (NASA)

2016 ET 2020

Dédiées à la recherche de traces de vie, ces deux missions enverront des rovers creuser le sol martien pour tenter d'y trouver des molécules organiques.

MISSION INSIGHT (NASA)

2018

Première mission géophysique martienne, Insight étudiera la structure interne de la planète. Objectif : mieux comprendre la formation de Mars.

JOURNEY TO MARS (NASA)

D'ICI LES ANNÉES 2030

La Nasa prévoit d'envoyer un équipage vers Mars dans une vingtaine d'années. Avec des étapes préalables, comme une station spatiale en orbite lunaire.



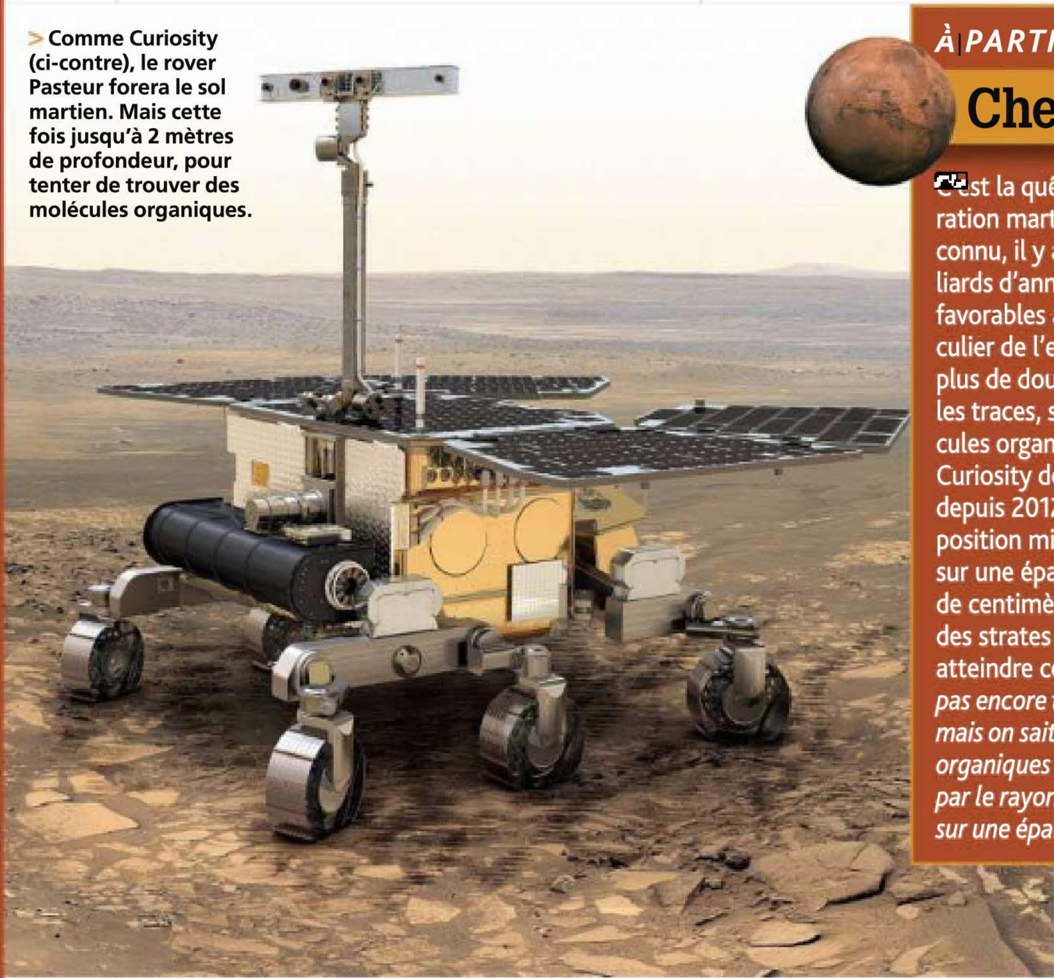
La quête de la vie sur Mars motive la quarantaine de missions qui s'y sont succédé depuis que les sondes Viking ont révélé, en 1976, des vestiges d'anciens fleuves asséchés ou de débordements cataclysmiques. De fait, selon les scientifiques, la planète rouge est l'objet du système solaire – Terre exceptée – où la vie a eu le plus de chances d'apparaître. Car il y a 3,5 à 4 milliards d'années, Mars a bien connu une période « chaude » où l'eau pouvait rester durablement liquide, comme le prouvent les argiles mises au jour par la mission Mars Express il y a près de dix ans. De l'eau liquide est-elle toujours présente ? La sonde MRO a montré à l'automne 2015 que des stries sombres pouvaient être dues à des écoulements encore sporadiques d'eau très salée. Mais au-delà de la recherche d'une vie extraterrestre, se dessine aussi en filigrane, à travers l'étude de Mars, la quête plus large de nos origines : celles du système solaire et des planètes sœurs de la Terre.

MARS ONE (PAYS-BAS) ET SPACEX (ÉTATS-UNIS)

PAS AVANT 2027

À l'instar du projet délirant MarsOne, le fondateur de la société américaine SpaceX envisage une colonie humaine sur Mars dans les vingt ans à venir.

NASA



> Comme Curiosity (ci-contre), le rover Pasteur forera le sol martien. Mais cette fois jusqu'à 2 mètres de profondeur, pour tenter de trouver des molécules organiques.

À PARTIR DE 2016

Chercher des tra

C'est la quête majeure de l'exploration martienne. Que Mars ait connu, il y a entre 3,5 et 4 milliards d'années, des conditions favorables à la vie, et en particulier de l'eau liquide, cela ne fait plus de doute. Reste à en trouver les traces, sous forme de molécules organiques. Le rover Curiosity de la Nasa s'y emploie depuis 2012. Il explore la composition minéralogique du sol sur une épaisseur d'une dizaine de centimètres, cheminant vers des strates d'argile qu'il devrait atteindre cette année. *« Il n'a pas encore trouvé grand-chose, mais on sait que les molécules organiques sont hachées menu par le rayonnement cosmique sur une épaisseur de sol de l'ordre*

À PARTIR DE 2018

Ausculter ses profondeurs

Trouver une forme de vie n'est pas le seul Graal que convoitent les scientifiques sur Mars. *« Mercure, Vénus, la Terre et Mars ont été formées avec des matériaux identiques au départ et, pourtant, à l'arrivée, ce sont des planètes très différentes. Cela fait partie des grandes questions que de comprendre pourquoi »*, souligne Francis Rocard, grand spécialiste de la planète rouge au Cnes. Pourquoi Mars n'a-t-elle quasiment plus de champ magnétique et a-t-elle perdu, de ce fait, une grande part de son atmosphère ? Pourquoi ne présente-t-elle pas de plaques tectoniques, comme la Terre ? Ou de volcans aujourd'hui actifs ? *« On n'a jamais fait de mission géophysique sur Mars »*, rappelle l'expert du Cnes. Pour réparer cette lacune, la sonde *InSight*, de la Nasa, à laquelle le Cnes participe, aurait dû être lancée cette année. Hélas, l'instrument central n'étant pas prêt, la Nasa a été contrainte de reporter la mission à 2018. Mais ses beaux objectifs demeurent : mesurer la propagation des ondes sismiques dans le sous-sol martien pour étudier sa structure interne et sa nature, solide ou liquide, sur de grandes profondeurs jusqu'au noyau ; ainsi que déterminer le flux de chaleur qui s'en échappe, pour savoir à quelle vitesse la planète s'est refroidie à l'échelle de 4,5 milliards d'années. Une troisième expérience, enfin, mesurera les petites oscillations de l'axe de rotation de la planète, en mesurant les différences d'effet Doppler qu'elles produisent sur les transmissions radio. Des oscillations créées par les inhomogénéités dans la structure interne de la planète et les condensations successives des glaces aux pôles. De quoi mieux comprendre comment, à partir des premiers débris du disque protoplanétaire, se sont formés peu à peu un noyau, un manteau, une croûte… qui donnent à Mars son identité unique.



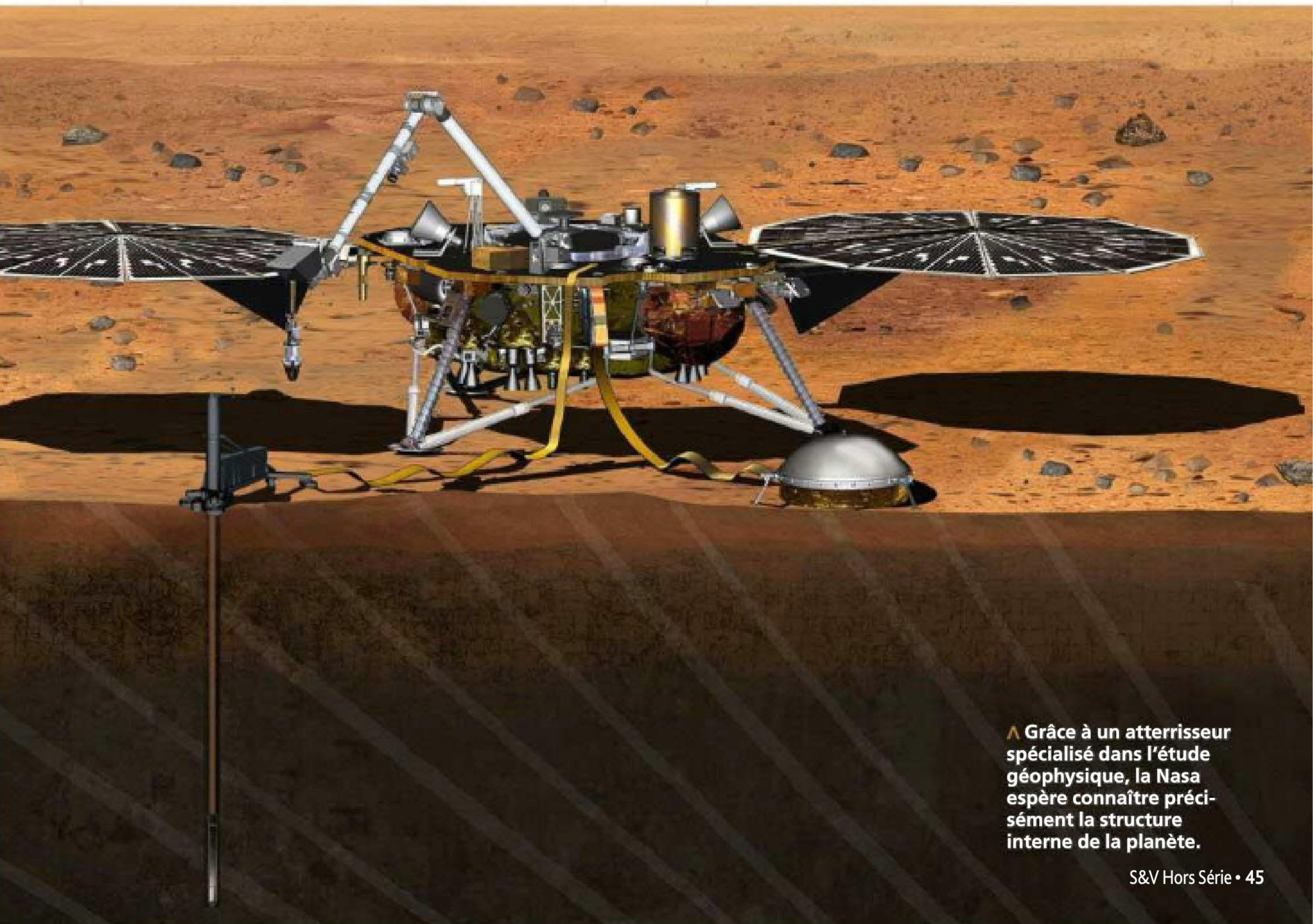
AOES MEDIALAB/ESA - JPL CALTECH/NASA

ces de vie

du mètre », rappelle Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Cnes. Il va donc falloir creuser plus profond pour mettre toutes les chances de son côté. Le rover Pasteur, qui devrait être lancé en 2020 dans le cadre de la mission européenne et russe ExoMars, forera donc jusqu'à deux mètres de profondeur.

DU GAZ D'ORIGINE ORGANIQUE ?

Le rover sera également équipé de différentes caméras, dont un radar pénétrant le sol, des spectromètres laser Raman et infrarouge pour analyser la composition minéralogique en surface, et un chromatographe en phase gazeuse pour détecter la présence de marqueurs biologiques sur des échantillons. Lancé le 14 mars 2016, l'orbiteur de la mission (sonde *TGO* et atterrisseur Schiaparelli) analysera, lui, l'atmosphère à la recherche de différents gaz éventuellement présents en quantités infimes. En particulier des émanations de méthane, car elles pourraient être, comme sur Terre, d'origine organique, si aucun autre mécanisme susceptible d'en produire ne « collait » avec les données (relargages de gaz gelé piégé sous la surface ou dégradation par les rayons UV de molécules organiques provenant de météorites, par exemple).
Avec Mars 2020, la Nasa privilégie une autre approche (qui était initialement celle d'ExoMars) : prélever, toujours à l'aide d'un rover, à différentes profondeurs des échantillons de roche dans des terrains sédimentaires ayant été longtemps au contact de l'eau, et les stocker provisoirement sur place. En attendant qu'une autre mission, non encore programmée, ne les récupère plus tard pour les ramener sur Terre. À moins que les scientifiques américains ne préfèrent, d'ici-là, en ramener d'autres, prélevés ultérieurement et jugés plus intéressants. L'intérêt ? Pouvoir ensuite les analyser sur Terre avec des instruments bien plus performants, mais beaucoup plus encombrants que ceux installés sur les rovers. Peut-être y trouvera-t-on alors la preuve infime d'une vie passée ou, mieux encore, actuelle !



^ Grâce à un atterrisseur spécialisé dans l'étude géophysique, la Nasa espère connaître précisément la structure interne de la planète.



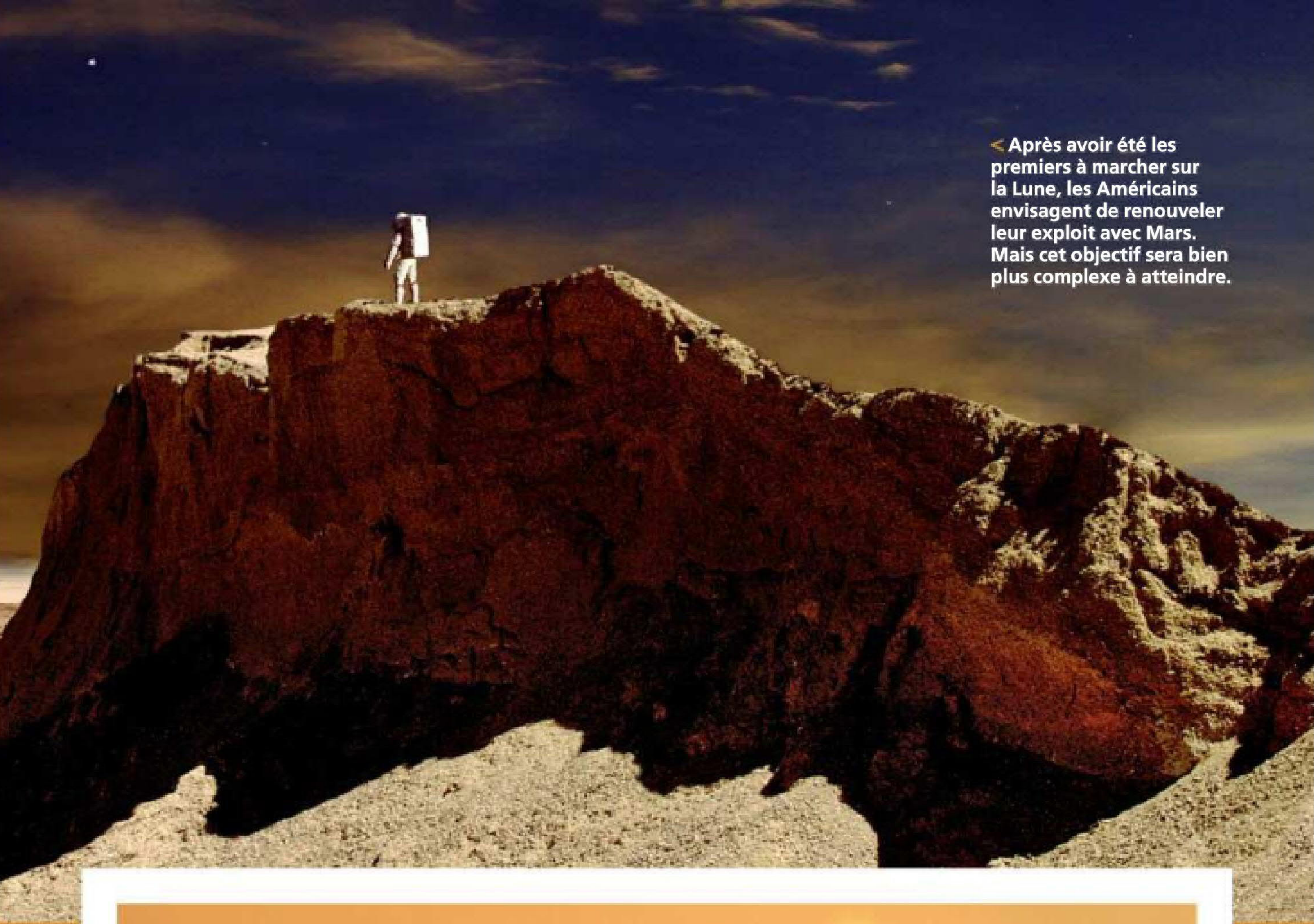
GETTY - SHUTTERSTOCK

D'ICI LES ANNÉES 2030

Y envoyer une mission habitée

Poser le pied sur la planète rouge, et y implanter une colonie, serait l'occasion pour l'homme de tester sa capacité à voyager loin et longtemps. Mais les difficultés du projet sont telles qu'il sera nécessaire de procéder par étapes.

Pour le National Research Council (NRC) américain, missionné par la Maison Blanche pour guider la stratégie spatiale des États-Unis dans les décennies à venir, poser un homme sur Mars ne va pas de soi. En préambule de son rapport « Pathway to Exploration », publié en 2014, il prévient sans détours : *« Aucun argument ne semble justifier, à lui seul, de poursuivre les vols habités. »* Envoyer des hommes sur Mars n'est pas motivé par le besoin d'accroître nos connaissances sur cette planète : sondes et rovers le font déjà très bien, pour cent fois moins cher ! L'homme n'ira pas non plus pour booster des technologies utiles à l'économie américaine : les retombées techniques d'un tel programme sont imprévisibles.



< Après avoir été les premiers à marcher sur la Lune, les Américains envisagent de renouveler leur exploit avec Mars. Mais cet objectif sera bien plus complexe à atteindre.



Il n'ira pas plus pour assurer la défense de l'Oncle Sam : la guerre froide étant terminée, les États-Unis n'ont pas besoin de la planète rouge pour prouver leur suprématie au monde. Aller sur Mars ne suscitera pas non plus autant de vocations scientifiques qu'a pu faire naître le programme Apollo, d'autres défis pouvant paraître davantage prioritaires pour la jeunesse d'aujourd'hui. Et pourtant, le rêve d'envoyer un homme sur Mars reste d'actualité ! C'est que, comme le souligne le NRC dans son rapport, une mission habitée vers Mars relève d'arguments plus intemporels. Comme la survie de l'espèce humaine, qui pourrait bien s'éteindre un jour si elle devait rester confinée sur une Terre fragile. Ou le besoin fondamentalement humain d'explorer et de relever des défis, qui a été un moteur essentiel de son évolution. Et aussi cette idée de frontière à repousser toujours plus loin, chère au peuple américain.

AUX LIMITES PHYSIOLOGIQUES HUMAINES

Spécialiste en propulsion spatiale et consultant chez le motoriste spatial Safran, Alain Souchier avance une raison plus pragmatique : *« Mars est le meilleur banc d'essai pour savoir si l'humanité peut s'implanter sur une autre planète que la Terre. Compte tenu des ressources qui y sont disponibles (glace, matériaux…), si l'homme ne peut pas s'établir sur Mars, il ne pourra pas s'établir ailleurs. »* Aller sur Mars, donc, pour se prouver qu'on en est capable. *« Comme objectif à long terme, il y a unanimité aux États-Unis pour dire que c'est l'homme sur Mars. Et comme les Américains sont les leaders, ils estiment que c'est à eux de faire le job »*, constate de son côté Francis Rocard, responsable des programmes d'exploration du système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes). *« Mars est l'objectif le plus lointain compatible avec les limites physiologiques humaines et les technologies probablement développées dans le futur »*, renchérissent les experts du NRC, tout en prévenant qu'un tel objectif nécessitera plusieurs dizaines d'années.

Concrètement, comment y aller? Les étagères de la Nasa débordent de projets plus ou moins grandioses, régulièrement élaborés, puis enterrés depuis soixante ans. Le dernier en date, le programme Constellation, lancé par le président George W. Bush en 2004, prévoyait une base lunaire permanente peu après 2020, point de départ d'un envol, quelques années plus tard, vers Mars. Sans budget à la hauteur de l'enjeu, il fut abandonné en 2010 par le nouvel hôte de la Maison Blanche. La crise financière était passée par là… Depuis, la Nasa s'est résignée à des feuilles de route plus modestes. Son nouveau credo ? Y aller pas à pas, sans brûler les étapes. Son budget, actuellement de 18 milliards de dollars pour l'ensemble de ses missions (dont environ 8 milliards pour l'ensemble des vols habités), ne sera pas multiplié par dix, comme il a pu l'être au démarrage d'Apollo, même si la Nasa a obtenu en 2016 une rallonge inattendue d'un peu plus de 1 milliard. Or les défis techniques à relever sont nombreux.

« Du point de vue des missions spatiales, les missions planétaires sont les plus difficiles. Celles qui se posent sont plus difficiles que celles qui restent en orbite, et celles qui se posent sur Mars sont plus difficiles que toutes les autres », confirme Francis Rocard. Pourquoi ? Parce que contrairement à un vulgaire astéroïde, la planète rouge a une gravité conséquente. *« Or Mars a une atmosphère relativement ténue. Ainsi, un bouclier doublé d'un parachute ne suffit pas. Il faut un système de freinage qui complexifie beaucoup les choses. La première difficulté, c'est vraiment de se poser »*, insiste-t-il.

Autre grande difficulté : la durée du voyage. Aller sur la Lune ne prend pas plus de trois jours. Mais aller sur Mars nécessite au minimum six mois ! Et encore, dans la configuration la plus favorable, quand la Terre et Mars sont à la distance minimale l'une de l'autre (voir encadré p. 51). Par ailleurs, le retour doit impérativement se faire soit 30 jours plus tard, mais avec un trajet de treize mois pour « rattraper » la Terre sur son orbite, soit 500 jours plus tard, pour bénéficier du créneau favorable suivant. Ce qui fait alors plus de deux ans et demi loin de la Terre ! Une épreuve pour les astronautes, et une masse considérable de vivres, d'eau et de matériels à envoyer. Nourrir l'équipage durant le voyage nécessitera déjà une tonne d'eau et de vivres par passager ! Et s'il doit rester 500 jours sur Mars, cet équipage devra, en outre, disposer d'un minimum de confort. Résultat : les modules d'habitation devraient avoir une masse de l'ordre d'une trentaine de tonnes. *« Les configurations les plus optimistes prévoient trois grosses fusées de la taille de* Saturn V *pour envoyer l'ensemble du matériel nécessaire, soit trois fois la mission lunaire. Et les plus prudentes,*

Mars est le meilleur banc d'essai pour savoir si l'humanité peut s'implanter sur une autre planète que la Terre

D. FLORENTZ

Le voyage se précise

Comment, concrètement, amener un premier équipage d'astronautes sur le sol martien ? De nombreux détails restent encore à régler. Mais la Nasa peut s'appuyer sur un scénario aujourd'hui solide. Détails en 5 étapes.

1 Prologue automatisé

Après une phase d'assemblage (en orbite terrestre ou lunaire) de ses différents éléments, un vaisseau cargo automatisé dépose sur Mars des équipements utiles pour une future mission habitée : habitacles, générateurs électriques, systèmes de production *in situ* de carburant…

2 Départ d'un équipage

Un nouveau vaisseau, lui aussi assemblé en orbite, mais équipé cette fois d'un module habitable, amène l'équipage vers Mars. Durée du voyage : six mois minimum. De quoi éprouver les astronautes, à la fois physiquement et mentalement.

3 Rendez-vous pour la descente

Pendant que le vaisseau mère reste en orbite martienne, l'équipage s'arrime à un module d'atterrissage laissé en orbite par la mission automatisée précédente. Ce dernier déposera aussi du matériel, qui servira pour la mission habitée suivante, l'équipage utilisant celui déposé par la mission précédente.

4 Cinq cents jours d'exploration

Durant leur séjour, ces premiers « Martiens » multiplient les expériences scientifiques. Leur mission terminée, ils regagnent le vaisseau mère resté en orbite grâce à leur module d'ascension.

5 Retour sur Terre

À l'issue d'une épopée de deux ans et demi environ, l'équipage rentre enfin sur Terre. Il est protégé des frottements atmosphériques (qui portent la température à plus de 2 000 °C !) par la capsule *Orion,* déjà développée.

sept lancements avec un lanceur lourd, soit sept fois la mission lunaire ! » s'exclame Alain Souchier.

Or faire atterrir sur Mars un module de plusieurs dizaines de tonnes, alors que celui du rover Curiosity n'en faisait guère qu'une, est un sacré défi. *« Au moment de l'entrée dans l'atmosphère martienne, il va falloir augmenter la surface de freinage par rapport à l'objet, avec des volets déployables ou des structures gonflables »,* anticipe le consultant. Reste la deuxième phase, tout aussi délicate : l'ouverture du parachute. Celui de Curiosity faisait déjà 16 m de diamètre. Il paraît inconcevable d'en imaginer un dix fois plus grand ! *« Il faudra donc demander davantage aux rétrofusées et disposer de plus de carburant »,* conclut Alain Souchier.

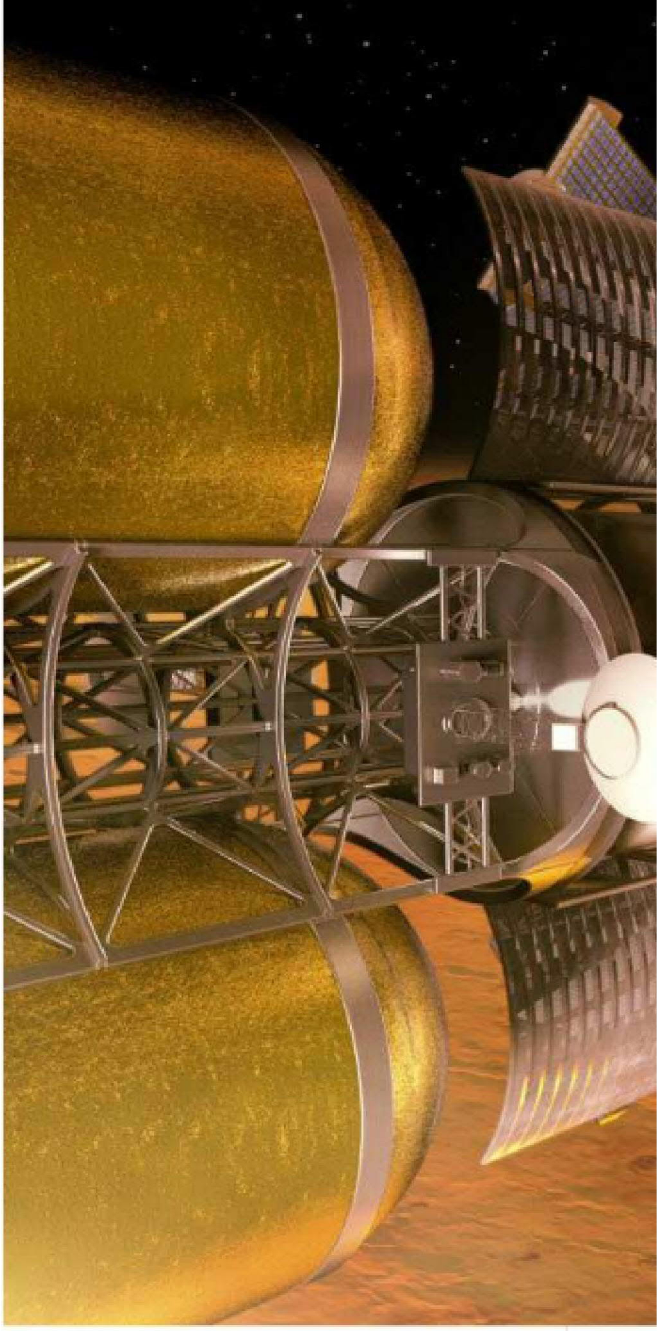
DEUX ANS ET DEMI D'ISOLEMENT TOTAL

Comment vivre, ensuite, sur une planète où il fait aussi froid la nuit qu'en Antarctique, dans une atmosphère quasiment sans oxygène et empoisonnée de gaz carbonique, où la pression est si faible que la salive ou le sang entrent en ébullition dès que la température dépasse 0 à 5 °C ! *« Il va falloir des scaphandres capables de tenir 500 jours »,* prévient Alain Souchier. Certes, les séjours dans la Station spatiale internationale (ISS) ont montré que c'était possible ; mais l'environnement y est bien moins poussiéreux que sur Mars…

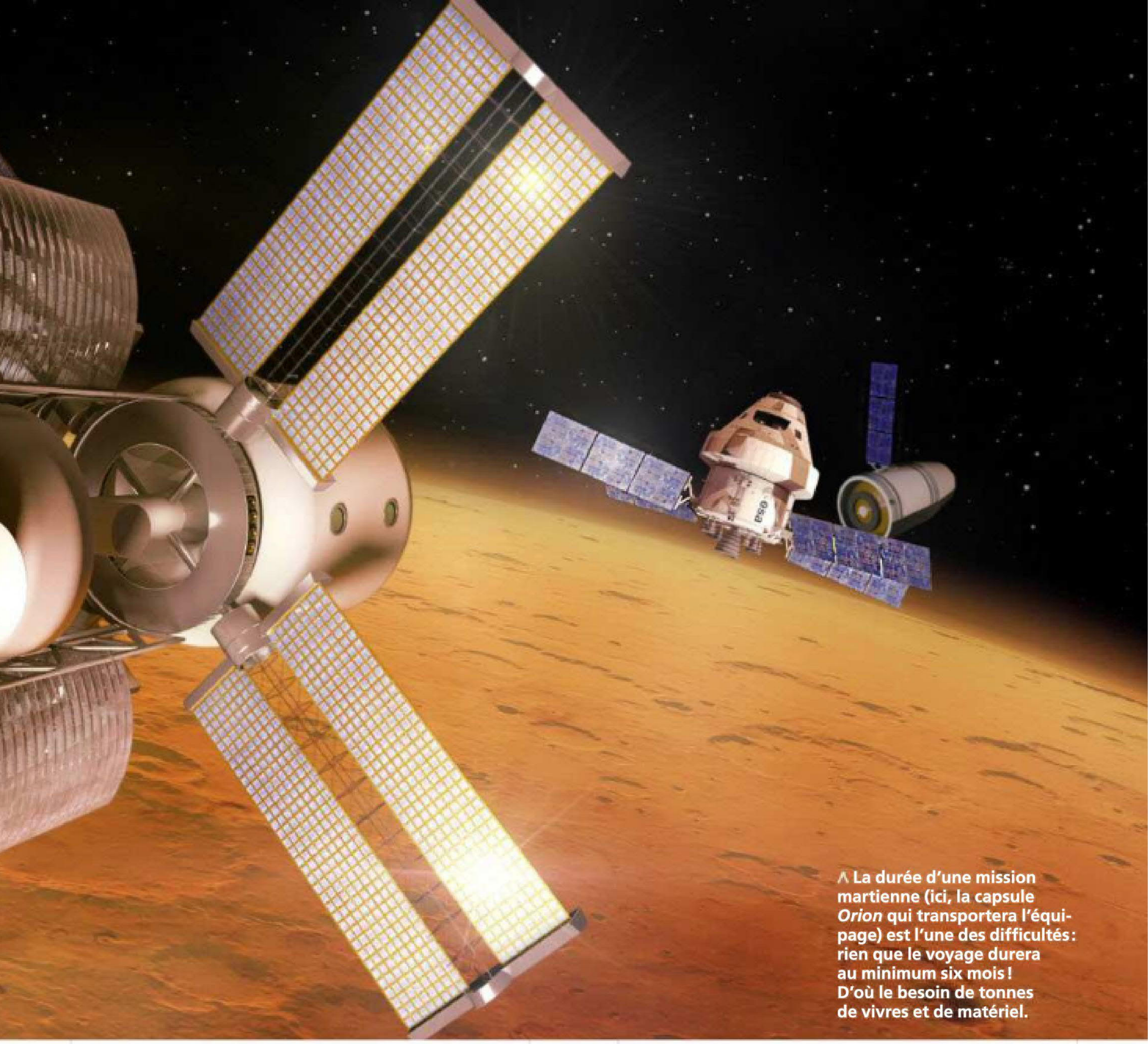
Le film *Seul sur Mars* (Ridley Scott, 2015) donne bien à voir cet environnement saturé de poussières, même s'il comporte des incohérences. L'atmosphère étant 100 fois moins dense sur la planète rouge que sur Terre, des tempêtes de 200 km/h y ont un effet équivalent à celui d'une brise de 20 km/h sur Terre. Pas de quoi tout renverser ! Les couchers de soleil y sont bleus, justement à cause de cette poussière, aux grains plus fins que sur Terre, et pas rouges. *« Et Hollywood n'a pas une très bonne perception de ce qu'est la pression. Quand le héros remplace son sas par une simple bâche, ça ne tient pas la route. Si vous calculez l'effort qu'il y a sur cette toile, on trouve 30 tonnes ! Avec presque 1 bar de pression à l'intérieur, elle devrait être tendue comme une peau de tambour »,* note Alain Souchier, qui reconnaît néanmoins que cette vision hollywoodienne de l'homme sur Mars est plus réaliste que les précédentes.

D'ailleurs, le film aborde une question qui préoccupe au premier chef les scientifiques : les astronautes supporteront-ils, psychologiquement, deux ans et demi d'isolement total ? *« Sur la station spatiale, vous êtes isolé, mais vous voyez la Terre en dessous de vous et vous savez qu'en moins de deux heures vous êtes de retour s'il le faut »,* rappelle Alain Souchier. Rien de tel sur Mars, où il faut entre 3 et 20 minutes au moindre message, envoyé vers la Terre à la vitesse de la lumière par ondes radio, pour arriver au destinataire, et autant pour la réponse. S'il craque, l'homme pourrait donc se révéler le maillon faible de la mission. Comment préparer les astronautes à relever ce défi ? Faut-il y envoyer des surhommes ? Pas forcément. Car c'est plutôt la cohésion du groupe qui fera la différence. Mieux vaut donc sélectionner l'équipage qui aura démontré qu'il était *a priori* celui qui fonctionnait le mieux en situation difficile. Différentes simulations, à Moscou, en Arizona, dans le désert de l'Utah ou à Hawaï, n'ont pas donné jusqu'à présent de raison d'être inquiet. Mais les cobayes savaient qu'ils étaient sur Terre…

Retour au défi technologique : comment repartir une fois la mission terminée ? Après avoir fait le plein



AEROSPACE/NASA



ᐱ La durée d'une mission martienne (ici, la capsule *Orion* qui transportera l'équipage) est l'une des difficultés : rien que le voyage durera au minimum six mois ! D'où le besoin de tonnes de vivres et de matériel.

sur place, bien sûr ! Tous les scénarios actuellement envisagés prévoient de fabriquer à partir des ressources martiennes le carburant du retour, qui serait bien trop lourd à emporter au départ. Une piste est d'amener de l'hydrogène liquide depuis la Terre et de le faire réagir avec le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère martienne, pour obtenir du méthane et de l'oxygène. Car le rendement de cette réaction est exceptionnel : 6 tonnes d'hydrogène fournissent 116 tonnes d'oxygène et de méthane ! À condition, bien sûr, d'avoir conçu des moteurs qui puissent utiliser ce carburant… Et sachant qu'oxygène et méthane devront être conservés à −180 °C pour rester liquides. Il s'agit donc de concevoir un système réfrigérant fiable, puisque si le carburant fait finalement défaut, personne ne rentre !

Deux principes guident ainsi tous les scénarios envisagés : installer sur place, par des missions

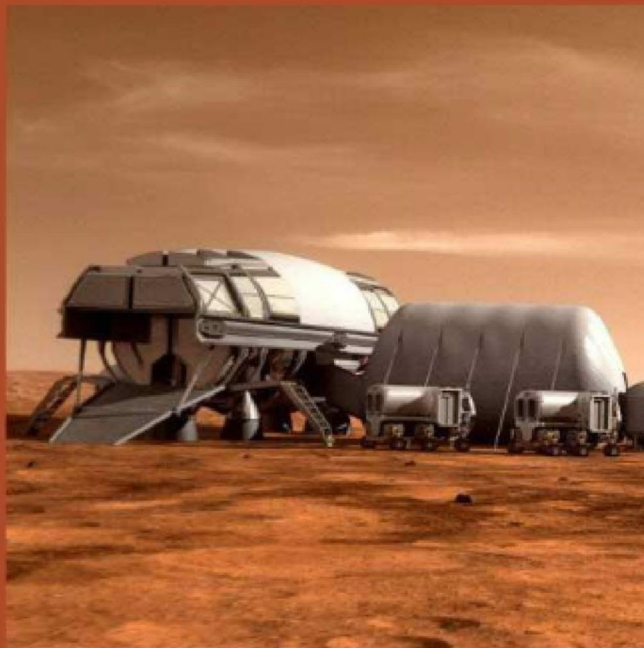
UN ALLER-RETOUR À DATES FIXES

Pour voyager de la Terre vers Mars il faut composer avec les orbites des deux planètes. Mars met presque deux fois plus de temps (687 jours) que la Terre à décrire la sienne. Tous les 26 mois environ, la Terre double donc sa planète sœur sur son orbite. Mars est alors dite en opposition car, dans le ciel terrestre, elle est dans la direction opposée au Soleil. Inversement, tous les 26 mois, Mars est en conjonction lorsqu'elle se situe derrière le Soleil. Cette configuration offre les conditions les plus économes en carburant, avec un trajet de 6 mois. Mais entre-temps, la Terre a doublé Mars et s'en éloigne. Il faut donc attendre 18 mois pour retrouver la même configuration. La mission dure alors deux ans et demi (6 mois aller, 18 mois sur place, 6 mois retour). On peut réduire cette durée en privilégiant une configuration d'opposition, mais en ne restant qu'un mois sur place. Et la trajectoire est plus gourmande en carburant.

non-habitées préalables, le plus grand nombre d'éléments (dont la source d'énergie électrique, la seule forme d'énergie utilisable sur place) avant l'arrivée du premier équipage ; et avoir des systèmes redondants pour pallier toute défaillance. Chaque mission habitée apportant avec elle les éléments qui serviront pour la suivante, ou pour elle en cas d'incident. Ce qui suppose une certaine précision à l'atterrissage, pour ne pas déposer l'équipage à plus d'une centaine de kilomètres de la base, distance maximale franchissable si l'équipage dispose d'un véhicule de type jeep lunaire.

PREMIÈRE ÉTAPE, L'ORBITE LUNAIRE

Quel scénario précis sera adopté pour poser les premiers pas d'un homme sur Mars ? Pour l'instant, nul ne le sait. Ni même quand aura lieu précisément cette conquête d'un nouveau monde. Seule certitude : l'emballement d'Apollo, qui a vu tout un programme se développer en moins de dix ans pour aboutir, en partant de zéro, à un homme sur la Lune, ne se répétera pas pour Mars. *« On ne peut pas tout de suite se fixer l'objectif le plus difficile, Mars. Il faut passer par des étapes intermédiaires »*, confirme Francis Rocard. Étapes dans lesquelles on trouve, pêle-mêle, l'orbite lunaire, une base lunaire, une mission habitée vers un astéroïde, puis vers une lune martienne comme Phobos, l'orbite martienne… *« Personne ne sait dans quel ordre cela se fera. Chacune de ces étapes présente un intérêt, mais demandera de développer de gros outils à 50 milliards de dollars pièce, qui seront utiles ensuite pour aller sur Mars. C'est toute une stratégie de développement sur vingt, trente, voire quarante ans »*, souligne l'astrophysicien du Cnes.



Pour pallier toute défaillance, chaque mission habitée apportera avec elle les éléments qui serviront pour la suivante ou pour elle en cas d'incident.

puisse voir rapidement des progrès, insiste Alain Souchier. *On ne peut pas convaincre un homme politique, qui a un horizon de quatre ou huit ans, s'il est réélu, de financer un projet grandiose pour dans vingt ans. Il faut des étapes intermédiaires, qui fassent sens d'un point de vue technique. »*

La Nasa en présente actuellement trois. D'abord, concevoir des infrastructures en orbite terrestre, comme la Station spatiale internationale. Ensuite, développer les mêmes outils en orbite lunaire, mais

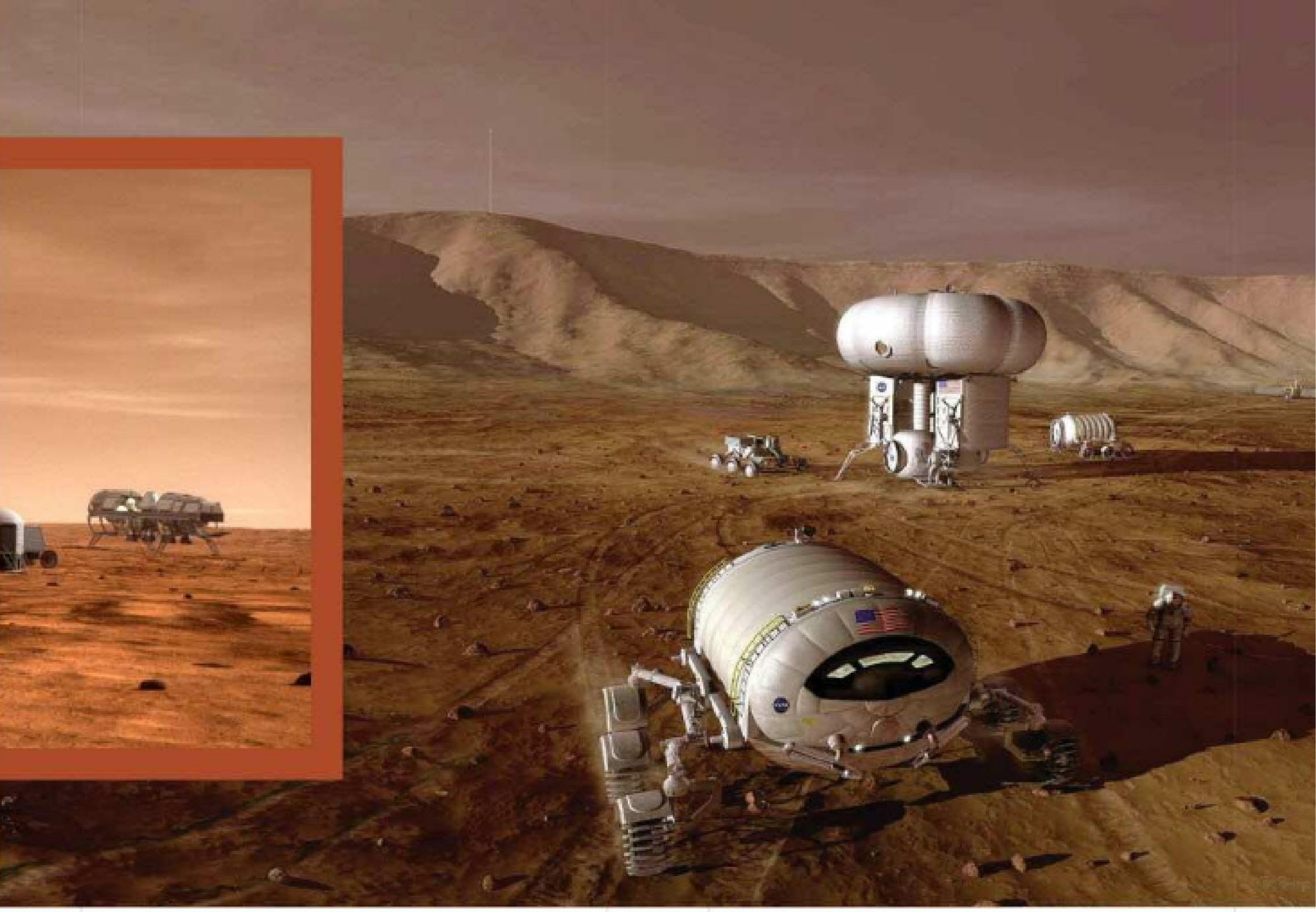
La Nasa dispose déjà de deux éléments clés : un lanceur lourd, le* SLS*, et la capsule* Orion*, pour ramener l'équipage sur Terre

Pour l'heure, la Nasa évoque, dans la feuille de route Journey to Mars qu'elle s'est fixée pour les vingt ans à venir, la mise en orbite lunaire d'une station spatiale. Barack Obama avait manifesté sa volonté de poser un Américain sur un astéroïde en 2025. La Nasa a redessiné le projet et propose d'amener d'abord l'astéroïde, grâce à une propulsion électrique, en orbite lunaire (Asteroid Redirect Mission, voir p. 35). Mais que décidera le prochain président, qui sera élu en novembre prochain ? Contrairement à l'Agence spatiale européenne (ESA), la Nasa négocie chaque année son budget avec la Maison Blanche et le Congrès. *« Il faut donc que le public*

sans installer de base permanente sur la Lune. Cela évite d'avoir à s'y poser puis à en repartir, l'un des défis les plus difficiles, et permet de bénéficier d'orbites plus stables qu'autour de la Terre pour assembler le matériel nécessaire au grand saut final vers Mars, en autonomie totale. Un premier équipage pourrait alors être envoyé sur l'une des deux lunes martiennes, Phobos ou Déimos, dans les années 2030, et un homme pourrait poser un pied sur la planète rouge quelques années plus tard (voir infographie p. 49).

Pour cheminer sur ce *pathway*, la Nasa dispose pour l'heure de deux éléments clés : un lanceur

AEROSPACE/NASA - RAWLINGS 2007/NASA

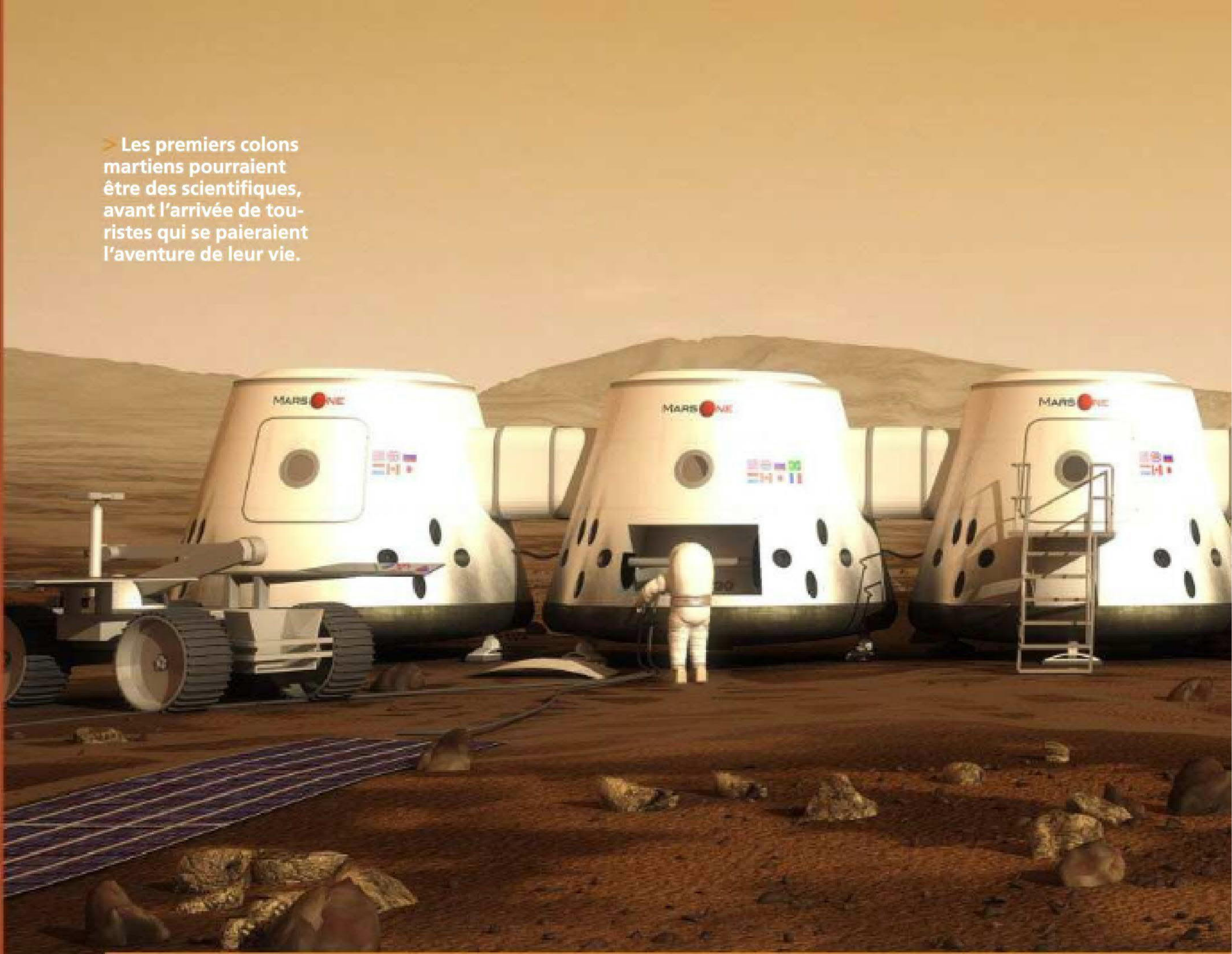


lourd, le *SLS* (*Space Launch System*), qui devrait être capable en 2018 d'envoyer entre 70 et 100 tonnes de charge utile en orbite terrestre, et de 100 à 130 tonnes à terme ; et la capsule *Orion* (dont le module de service est réalisé par l'ESA), pour ramener l'équipage sur Terre. Développer tout le reste va demander du temps et surtout de l'argent ! *« Un programme d'exploration spatiale humaine au-delà de l'orbite basse terrestre qui satisfait les principes de* pathway *n'est pas soutenable avec un budget qui s'accroît seulement pour corriger l'inflation »*, prévient le NRC. En d'autres termes, si l'on veut aller sur Mars sans sacrifier les autres programmes de la Nasa, il va falloir s'en donner les moyens.

UNE COURSE DE VITESSE AVEC LA CHINE

S'allier avec d'autres nations ? Déjà associés au développement de l'ISS, Europe, Russie et Japon bénéficieront sans doute d'un strapontin dans le vaisseau américain et développeront certains sous-systèmes. Mais en raison des efforts de coordination qu'elle suppose, une alliance n'est pas forcément synonyme de coûts réduits pour les États-Unis qui, de toute façon, assureront l'essentiel du programme. Reste la Chine, dont l'appétit spatial va croissant. *« En 2035, je pense que les Chinois seront en position de rivaliser avec les Américains sur Mars »*, pronostique Francis Rocard. La course à la Lune des années 1960, contre les Russes, pourrait donc se transformer assez vite en course vers Mars, contre les Chinois cette fois. Et convaincre l'Amérique de faire un réel effort financier pour la gagner.

Et après ? Les experts sont tous d'accord sur un point : éviter que ne se répète l'histoire d'Apollo, qui a vu les États-Unis planter d'arrache-pied un drapeau sur la Lune, puis l'abandonner rapidement, une fois la course gagnée, faute d'intérêt autre que symbolique. L'objectif, cette fois, serait d'aller sur Mars pour y rester. Alain Souchier déroule les quatre étapes, traditionnellement imaginées par les associations d'experts, de notre destinée martienne : *« Lancer d'abord les premières explorations, pour vérifier, par exemple, qu'on est bien capable de faire fonctionner un scaphandre pendant 500 jours dans une atmosphère poussiéreuse. Puis établir des bases d'une quarantaine de personnes, comme on en a en Antarctique aujourd'hui, essentiellement pour y faire de la science. Construire, ensuite, les bases d'une première colonie expérimentale, avant le stade final d'une colonie plus grande et permanente. »* Un rêve qui, dans quelques décennies, pourrait commencer à devenir réalité. L'humanité disposerait alors d'une seconde planète dans le système solaire… ●



> Les premiers colons martiens pourraient être des scientifiques, avant l'arrivée de touristes qui se paieraient l'aventure de leur vie.

PAS AVANT 2027



Y établir une colonie humaine

Une première colonie sur Mars, dès 2027, peuplée de pionniers sélectionnés parmi des dizaines de milliers de candidats. Voilà la fabuleuse promesse du projet Mars One, lancé en 2011. Particularité : aucun billet retour ! Les candidats finiront leurs jours sur la planète rouge, ce qui allège considérablement la mission ! Qui financerait ? La téléréalité. L'aventure serait en effet filmée et diffusée sur Terre. Tout cela est-il bien sérieux ? Les professionnels de l'espace les mieux disposés en doutent, les autres crient à l'escroquerie. *« Un projet évidemment bidon »*, commente sobrement Francis Rocard, au Cnes. Ne serait-ce que parce qu'aucun producteur de télé ne peut fournir les milliards d'euros nécessaires à une telle aventure. Mais le flot de candidatures reçues prouve une chose : s'installer sur Mars, même sans retour, est bien un projet qui fait rêver.

Pour Richard Heidmann, vice-président de l'association Planète Mars, l'installation d'une colonie sur la planète rouge est techniquement possible : *« Il faudrait investir d'une part, dans un système de transport vers Mars bon marché, et d'autre part, dans l'assemblage d'un établissement complet, pour offrir à des clients potentiels un service de transport et de résidence sur Mars. »* Pour quels clients ? L'ancien ingénieur spatial en voit de deux types : *« Des scientifiques missionnés pour faire des recherches sur le sol martien à un coût défiant toute concurrence grâce à l'effet de masse, et des touristes fortunés qui se paieraient l'aventure de leur vie. »* Touristes qui retourneraient sur Terre après un séjour de dix-huit mois sur place. La colonie pourrait ainsi, à terme, compter un millier de personnes, dont environ 300 touristes, 150 scientifiques et un peu plus de 500 employés qui vivraient là un rêve d'aventure tout en gagnant leur vie.

Le terme de colonie ne doit pourtant pas faire illusion : l'installation dépendra largement de la Terre pour s'approvisionner en vivres (on n'imagine pas des milliardaires se nourrir de patates pendant dix-huit mois…), en matériaux et en pièces de rechange diverses. Capables d'emporter 100 tonnes, les lanceurs actuels pourraient transporter, lors de rotations régulières entre la Terre et Mars, 100 passagers, 500 kg de vivres par passager pour le voyage

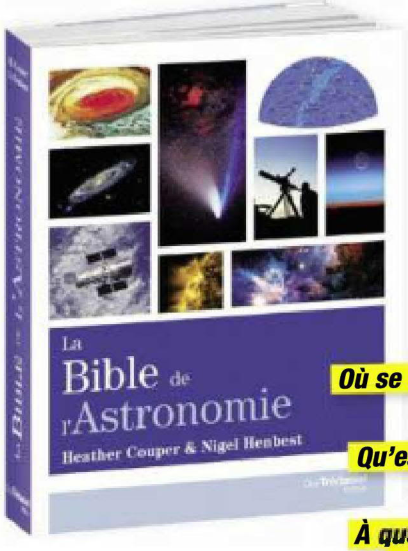


et 50 tonnes de fret pour ravitailler la colonie et compléter les cultures réalisées sur place dans des serres. L'eau étant fournie par les grandes quantités de glace contenues dans le sol martien.

ÉNERGIE SOLAIRE, BIEN SÛR

Côté énergie, de grands panneaux solaires sont la solution évidente, puisqu'il y fait toujours beau, hormis durant les tempêtes de sable. Il faudra donc prévoir des batteries ou des piles à combustible. *« Le problème,* reconnaît Richard Heidmann, *c'est qu'on ne pourra pas faire venir ces panneaux depuis la Terre, ils sont trop lourds. Il va donc falloir monter une chaîne de production sur Mars. »* Chaîne qui consommera elle-même beaucoup d'énergie… Pour le logement, *« des scénarios prévoient d'amener des habitats gonflables. C'est bien pour une petite base, mais pas pour une colonie de plus de 500 personnes »,* prévient Richard Heidmann. Si l'on compte 30 m² de surface moyenne habitable par personne, auxquels s'ajoutent 70 m² de serre, cela fait 100 m² pour chaque résident. Au total, la surface à construire est énorme ! *« Quels matériaux choisir ? Que ce soit du verre, de l'acier ou du plastique, les procédés sont très consommateurs d'énergie »,* s'inquiète Richard Heidmann, qui avoue une préférence pour le verre, qui permettrait d'admirer les paysages.
Assurer la sécurité de la colonie est encore un autre défi.
Une dépressurisation accidentelle peut être confinée par des portes étanches placées régulièrement. Mais quid des épidémies ou de personnes psychologiquement instables ? Même triés sur le volet, qui sait comment les premiers colons réagiront à cet éloignement extrême de la Terre ?
Reste l'essentiel : qui va rassembler les premières dizaines de milliards nécessaires pour lancer le projet ? Un industriel ne cache pas sa volonté d'y parvenir : Elon Musk, le fondateur de Paypal, qui devrait révéler les grandes lignes de son programme cet automne. Avec SpaceX, créée en 2002, il révolutionne aujourd'hui le domaine des lanceurs spatiaux en jouant la carte de leur réutilisation.
Et sa société Tesla de véhicules électriques valait déjà, en mars 2016, près de 30 milliards de dollars en bourse. Autant de raisons d'y croire ? L'avenir le dira…

www.laboutiquescienceetvie.com



Où se trouvent Andromède, ou Cassiopée ?

Qu'est-ce qu'un trou noir, une supernova ?

À quoi ressemble la surface de Jupiter ?

Percez les secrets de l'Univers !

Découvrez tout sur les constellations qui occupent la sphère céleste. Apprenez à identifier les planètes, les galaxies... Une Bible complète illustrée de nombreuses photos qui retrace l'histoire de l'Astronomie de ses origines (il y a 40 000 ans) aux dernières avancées scientifiques.

La Bible de l'Astronomie - 18 €

DIM. 14 x 16,7 CM. 400 PAGES. AUTEURS : HEATHER COUPER & NIGEL HENBEST. ÉDITIONS TRÉDANIEL.

LE SABLIER
15,90 €
seulement



Laissez-vous hypnotiser

Inlassablement, créez de nouvelles formes avec ce sablier écoulant une très fine limaille de fer, hautement magnétique. Chaque sculpture créée est unique. Influencez vos créations en penchant plus ou moins le sablier.

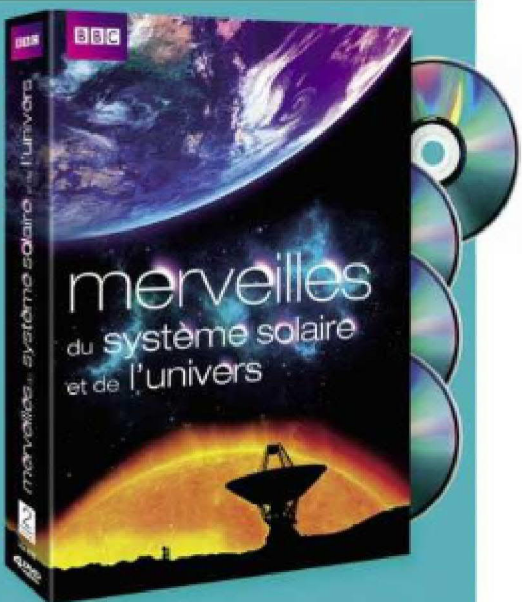
Sablier magnétique

SABLIER EN VERRE. BASE AIMANTÉE EN MÉTAL CUIVRÉ. SABLE : LIMAILLE DE FER (PARTICULES AIMANTÉES). CRÉATION DE « SCULPTURES » UNIQUES LORSQUE LA POUDRE TOMBE. DIMENSIONS APPROXIMATIVES : 14 x 8 x 8 CM.

Visuels non contractuels

> À VOIR ABSOLUMENT

LE COFFRET 4 DVD
30 €
seulement



Prêt pour un voyage extraordinaire ?

Pourquoi sommes-nous sur Terre ? D'où venons-nous ? Tout commence il y a 13,7 milliards d'années… Du Soleil à Neptune, des sommets enneigés aux plaines arides, explorez notre planète et le système solaire en compagnie du professeur *Brian Cox* et percez les mystères de l'Univers et de son origine…

Coffret DVD « Merveilles du système solaire et de l'Univers »

COFFRET 4 DVD. 9 PARTIES DE 55 MINUTES. BBC.



Un classique du XVIe siècle !

La densité du liquide varie en fonction de la température. Inventé par Galileo Galilei (1564-1642), ce thermomètre mesure la température précise, de manière originale et décorative. Plus ludique que les thermomètres électroniques et à mercure, la température est indiquée sur la médaille inférieure du groupe d'ampoules situées en haut.

Thermomètre de Galilée - 20 €

DIAMÈTRE : 30 MM. HAUTEUR : 24 CM.

La Boutique SCIENCE & VIE

Chaque mois, La Boutique *Science & Vie* sélectionne pour vous des livres, idées cadeaux et des objets scientifiques ou insolites.

L'ouvrage événement sur Mars !

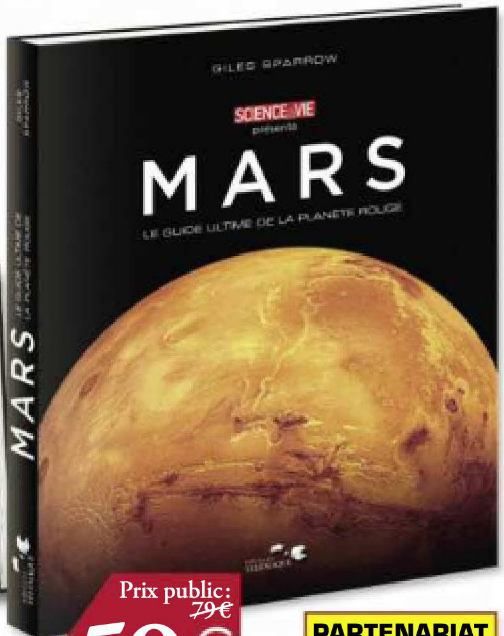
Offrez-vous cet ouvrage magnifique, richement illustré de photographies réalisées par la NASA et nous dévoilant les mystères de Mars, à partir des toutes dernières découvertes. Les paysages astronomiques sont tout simplement éblouissants.

Mars

AUTEUR : GILES SPARROW.
DIM. 35,3 X 43 CM.
224 PAGES. COÉDITION
SCIENCE & VIE ET TÉLÉMAQUE.

+ de 400 illustrations format gigantesque !

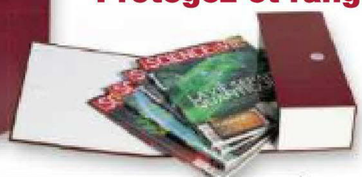




Prix public : ~~79 €~~
59 €
RÉDUCTION SPÉCIALE **-20 €**
FRAIS D'ENVOI **OFFERTS**

PARTENARIAT SCIENCE & VIE





Protégez et rangez vos magazines !

La reliure *Science & Vie* - 15 €

CONVIENT AUX TITRES SCIENCE & VIE
ET S&V HORS-SÉRIE.
COUVERTURE TOÎLÉE.
CONTIENT 12 NUMÉROS.

POUR COMMANDER ET S'INFORMER

www.laboutiquescienceetvie.com
Exclusivité Internet : Livraison en Points Relais®, PayPal®

Renvoyez le bon de commande avec votre règlement à
La Boutique SCIENCE & VIE - CS 90125 - 27091 ÉVREUX CEDEX 9

01 46 48 48 83 (6 jours/7 paiement CB uniquement)

EN CADEAU pour toute commande
le DVD Sciene & Vie « L'Univers invisible » *avec le code avantage* **379842**



BON DE COMMANDE

À RENVOYER DANS UNE ENVELOPPE AFFRANCHIE AVEC VOTRE RÈGLEMENT À :
LA BOUTIQUE SCIENCE & VIE - CS 90125 - 27091 ÉVREUX CEDEX 9

Articles	Réf.	Quantité	Prix	Sous-total
La Bible de l'Astronomie	394.700	x	18 €	= €
Sablier magnétique	385.773	x	15,90 €	= €
Coffret 4 DVD « Merveilles du système solaire et de l'Univers »	392.670	x	30 €	= €
Thermomètre de Galilée	388.926	x	20 €	= €
Livre « Mars »	382.614	x	59 € au lieu de ~~79 €~~	= €
Reliure Science & Vie format coffret	353.458	x	15 €	= €
			SOUS-TOTAL	€
Avec ma commande, je reçois en **CADEAU** le DVD **Science & Vie « L'Univers invisible »**				**OFFERT**
FRAIS D'ENVOI (cocher la case de votre choix)	☐ Envoi normal			6,90 €
	☐ Ma commande atteint 49 € Envoi Colieco			GRATUIT
	☐ Livraison rapide Colissimo			7,90 €
	☐ Ma commande atteint 75 € Livraison rapide Colissimo			GRATUIT
			TOTAL	€

Frais d'envoi offerts dès 49 € de commande !

Mes coordonnées

CODE AVANTAGE : 379842

☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom ____________ Prénom ____________

Adresse ____________

Complément d'adresse (résidence, lieu-dit, bâtiment) ____________

CP ____________ Ville ____________

Tél. ____________

Grâce à votre N° de téléphone (portable) nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre commande.

E-mail ____________

☐ Je souhaite bénéficier des offres promotionnelles des partenaires de *Science & Vie* (groupe Mondadori)

> Mode de paiement

☐ **Je règle par chèque** bancaire ou postal à l'ordre de SCIENCE & VIE
- ☐ en **1 fois** la totalité de ma commande
- ☐ en **3 fois sans frais** (à partir de 99 € d'achat)

☐ **Je règle par carte bancaire**
- ☐ en **1 fois** la totalité de ma commande
- ☐ en **3 fois sans frais** (à partir de 99 € d'achat)

PAIEMENT 3x SANS FRAIS

Carte bancaire N° ____________

Expire fin : ___ / ___

Cryptogramme ___
Les 3 chiffres au dos de votre CB

Date et signature obligatoires

MONDADORI MAGAZINES FRANCE SAS - RCS 452 791 262 NANTERRE - CAPITAL : 60 557 458 €



VOIR ENFIN LES EXOPLANÈTES

Par Serge Brunier

LES TÉLESCOPES E-ELT (ESA), GMT ET TMT (PARTENARIATS)

ENTRE 2022 ET 2024

Actuellement en construction au Chili et à Hawaï, ces trois télescopes géants permettront de photographier enfin les exoplanètes depuis la Terre.

JWST (NASA/ESA), *WFIRST* (NASA) ET *HDST* (NASA/ESA)

2018, 2024 ET 2030

Ces futurs télescopes spatiaux seront capables de détecter des exoplanètes comparables à celles du système solaire et même d'y chercher des signes de vie.

LE TÉLESCOPE SPATIAL À MIROIR VIRTUEL *EEI*

PAS AVANT 2040

Constitué de milliers de télescopes spatiaux, cet instrument imaginé par l'astronome Antoine Labeyrie permettrait de voir en détail les exoplanètes.



La toute première exoplanète (planète tournant autour d'une autre étoile que le Soleil), 51 Pegasi b, a été découverte en 1995 à l'observatoire de Haute-Provence par les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz. Depuis, le nombre d'exoplanètes découvertes croît à une vitesse exponentielle : 100 en 2002, 1000 en 2013, presque 3000 aujourd'hui, 10000 probablement avant 2020. Il y en aurait mille milliards dans notre galaxie ! Comme dans notre système solaire, ces mondes sont rocheux ou gazeux, petits ou géants… mais, à plus de 99 %, invisibles. Aussi, les méthodes d'observation pour les étudier sont indirectes : les scientifiques enregistrent les mini-éclipses ou les perturbations gravitationnelles qu'ils exercent sur leur étoile. Mais maintenant, on veut les voir ! Dans dix ans, des centaines de planètes apparaîtront comme des pixels colorés, et dans un quart de siècle, les astronomes pourront peut-être, avec un hypertélescope, observer des milliers d'autres mondes en détail.

ESO



> Doté d'un miroir de 39 m de diamètre, l'E-ELT (dont la livraison est attendue pour 2024) a été conçu pour obtenir des images directes d'exoplanètes.

ENTRE 2022 ET 2024

Mieux les étudier depuis la Terre

Longtemps, le pari a semblé fou : observer les planètes tournant autour d'autres étoiles ? Impossible ! Non seulement ces astres sont un million de fois plus lointains que ceux du système solaire, mais en plus, ils sont situés dans le halo aveuglant des étoiles qui les éclairent ! Comment voir un astre jusqu'à dix milliards de fois moins brillant que son étoile ? On connaît la réponse : presque vingt ans durant, les exoplanètes découvertes sont demeurées… invisibles ! Leur présence était détectée de manière indirecte, par l'influence gravitationnelle qu'elles exerçaient sur leurs étoiles, ou par l'infime affaiblissement de la lumière de celles-ci lorsqu'elles passaient devant elles.
Au cours des années 2000, quelques exoplanètes ont cependant été vues directement, les astronomes parvenant à les photographier grâce aux plus puissants des télescopes actuels : ceux équipés de miroirs de 8 m à 10 m de diamètre… Ces rares exoplanètes visibles, moins de 1 % des exoplanètes connues, sont de véritables « monstres » : des planètes géantes, situées à très grande distance de leur étoile, et surprises dans leur prime jeunesse. Ces mondes gazeux géants et brûlants (comme Beta Pictoris b, par exemple, dans la constellation du Peintre, qui est deux fois plus grande, huit fois plus massive que Jupiter et chauffée à 1400 °C) sont bien visibles en infrarouge, où ils brillent presque autant que leur étoile. Mais voir des Jupiters, des Saturnes, des Mars et, rêve absolu, de nouvelles Terres, c'est une autre affaire… Un défi impossible ? Non. La prochaine génération de télescopes géants, installés à Hawaï et dans la cordillère des Andes chilienne,

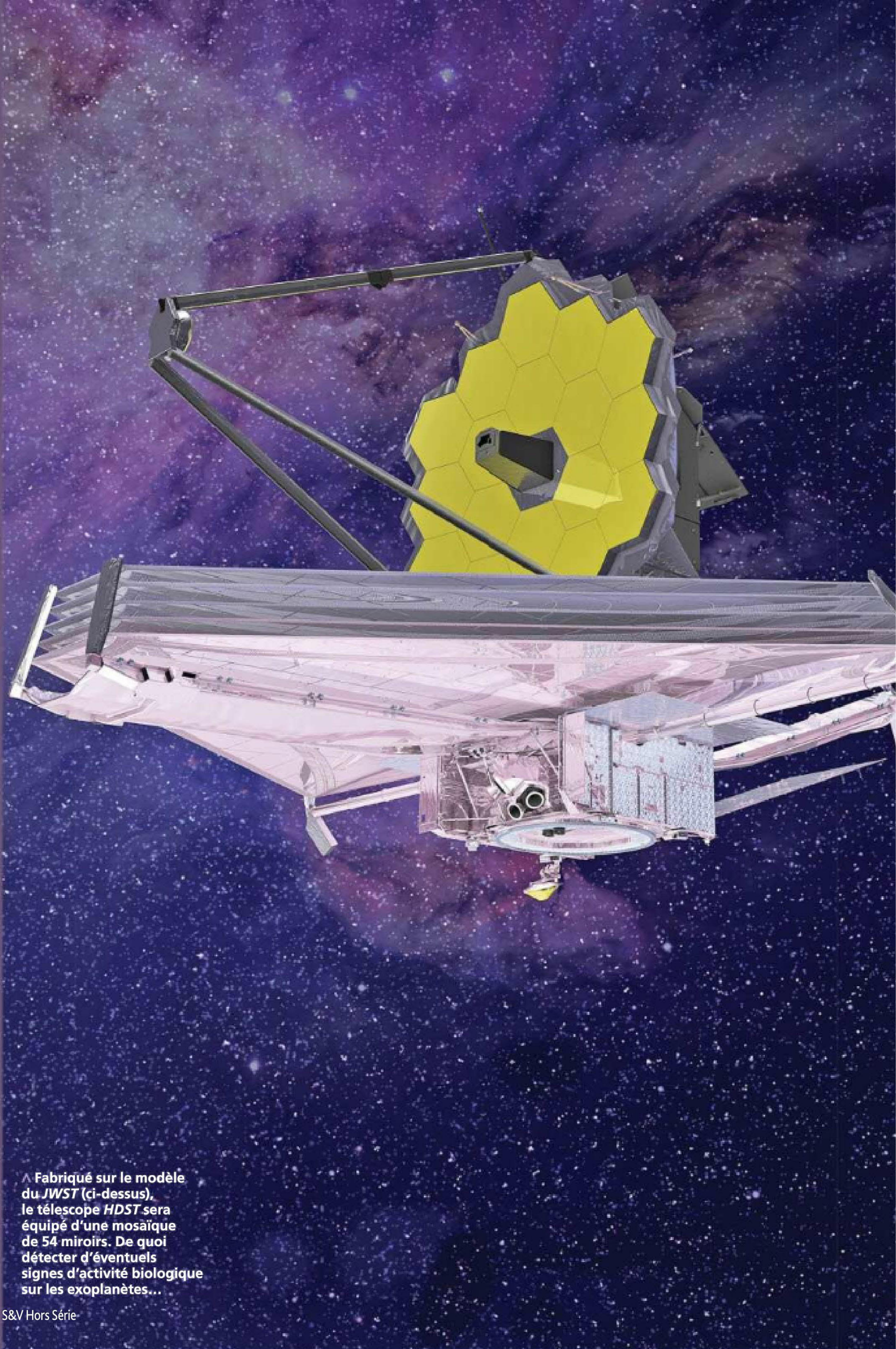


le relèvera, c'est désormais certain. Soit trois télescopes géants, actuellement en construction : le GMT (Giant Magellan Telescope) de 22 m de diamètre, le TMT (Thirty Meter Telescope) de 30 m de diamètre et, surtout, le E-ELT (European Extremely Large Telescope), dont le miroir de 39 m de diamètre aura la même surface que six courts de tennis !

UN SIMPLE PIXEL COLORÉ

Dès le début de leur conception, dans les années 2000, ces trois monstres de technologie ont été prévus pour « voir » enfin les exoplanètes. Avatars de la « big science » internationale, ces machines géantes à 1 milliard d'euros pièce perceront, comme jamais jusqu'ici, le ciel entre 2022 et 2024. Avec, comme premières cibles, des exo-Jupiters et des exo-Saturnes. Que verront exactement ces télescopes avec leurs miroirs immenses ? Eh bien, pas grand-chose ! À la distance extraordinaire des exoplanètes (des millions de milliards de kilomètres), celles-ci ne présenteront qu'un pixel coloré sur les caméras électroniques. C'est tout ! Et c'est pourtant fantastique ! Car la lumière de l'exoplanète, accumulée pendant des heures et disséquée par le spectrographe du télescope géant, offrira aux astronomes une quantité prodigieuse d'informations sur ce monde lointain : notamment sa vitesse de rotation, la température de sa surface, la nature de son sol ou de son atmosphère, les éléments chimiques qui la composent… En revanche, cette future génération de télescopes géants ne pourra déceler aucune trace de vie sur ces autres mondes. Pour cela, il sera nécessaire d'envoyer des sondes dans le noir et le froid de l'espace…

ESO - P. CARRIL



^ **Fabriqué sur le modèle du *JWST* (ci-dessus), le télescope *HDST* sera équipé d'une mosaïque de 54 miroirs. De quoi détecter d'éventuels signes d'activité biologique sur les exoplanètes…**



À PARTIR DE 2018

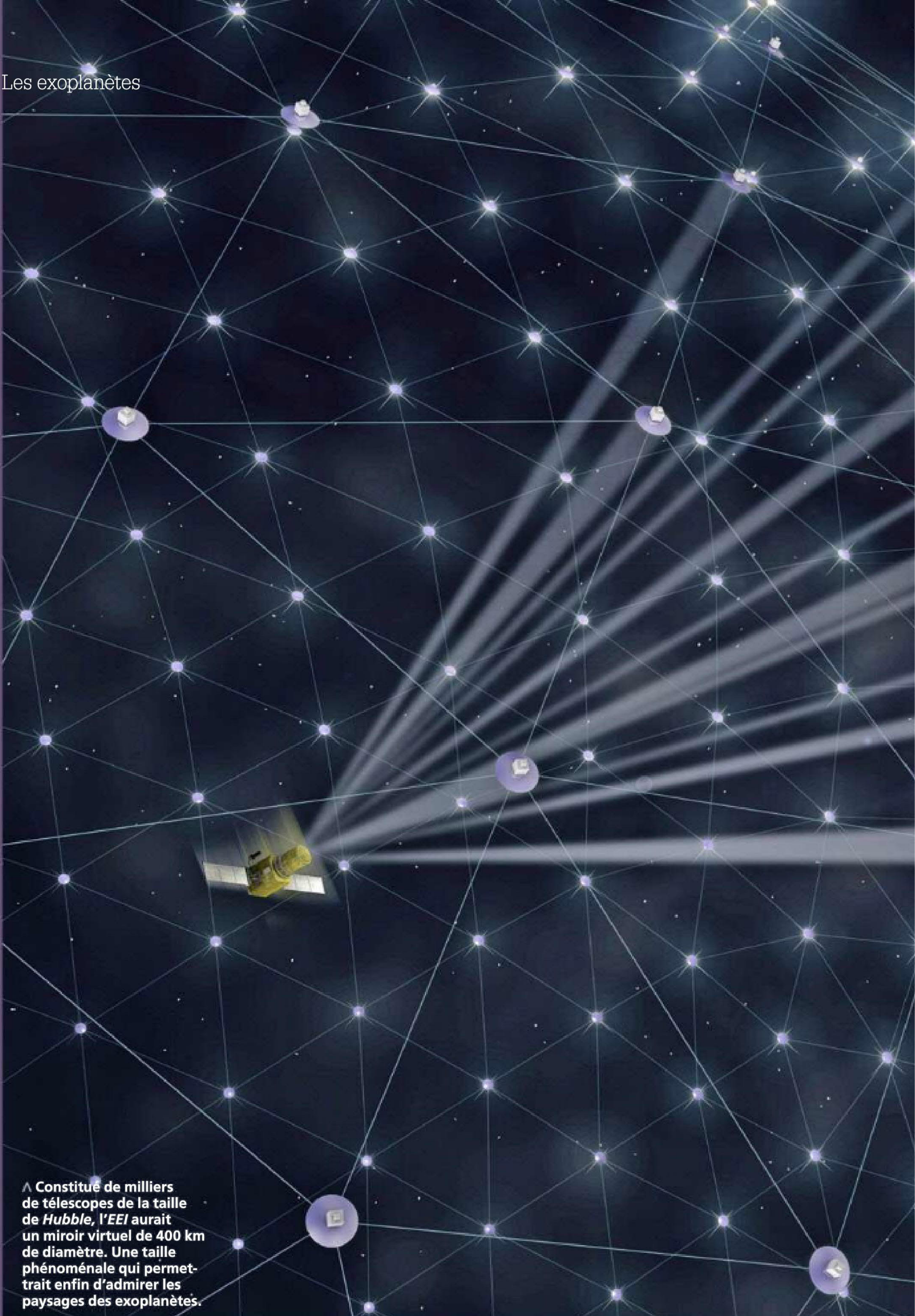
Y trouver des traces de vie

Les télescopes spatiaux ont fait avancer de façon cruciale l'étude des autres mondes de la galaxie. Mais les planètes qu'ils ont permis de découvrir ont été observées de façon indirecte, *via* les perturbations qu'elles exercent sur leurs étoiles. Pour la plupart, elles resteront d'ailleurs invisibles. Alors que trois futurs télescopes spatiaux (deux en phase de construction, le dernier à l'état de projet) permettront de photographier et d'étudier directement des centaines d'exoplanètes ! Et pas seulement des monstres massifs et brûlants, mais aussi des planètes comparables à celles tournant autour du Soleil ! Respectivement dotés de miroirs de 6,5 m et de 2,4 m, les télescopes *JWST (James Webb Space Telescope)* et *WFirst (Wide Field Infrared Survey Telescope)*, qui seront lancés en 2018 et en 2024, seront capables de voir des Jupiters, des Saturnes, des Uranus et des Neptunes, mais aussi des super-Terres, ces objets mystérieux dont il n'existe aucun représentant autour du Soleil. Il s'agit de mondes hybrides, entre les planètes rocheuses telles que Vénus, Mars et la Terre, et les petites planètes géantes gazeuses comme Uranus et Neptune. Les astronomes ne savent rien encore de ces mondes fascinants, qui pourraient déployer une diversité de caractéristiques vertigineuse… Planètes rocheuses trois fois plus grandes que la Terre et couvertes de lave, ou comparables à la Terre mais dix fois plus massives qu'elle, planètes-océans entièrement recouvertes d'eau… Tout ou presque est possible et peut être imaginé. Les astronomes pourront commencer à dresser une véritable encyclopédie galactique, dont un échantillon statistique permettra de connaître les familles planétaires et leurs caractéristiques. Surtout, ils sauront enfin exactement combien il existe de planètes aux caractéristiques physiques et météorologiques semblables à celles de la Terre, seule planète vivante connue dans l'Univers. Pourront-ils nous dire si ces sœurs ou ces cousines de la Terre sont, comme elle, vivantes ? Non. Ni le *JWST* ni le *WFirst* ne détecteront de mondes habités : la sensibilité et la précision exigées pour étudier des Terres dans le cosmos seront encore hors de portée pour cette génération technoscientifique.

UN SUPER SUPER HUBBLE

Ce n'est qu'en 2030 que l'une des grandes questions posées à l'humanité – sommes-nous seuls dans l'Univers ? – pourrait trouver une réponse. Les astronomes ont déjà défini l'outil dont ils ont besoin pour cette quête : un télescope spatial à 10 milliards de dollars, l'un des plus coûteux instruments scientifiques jamais construits ! Le *HDST (High-Definition Space Telescope)*, probablement international, est un super super *Hubble*. Doté d'un miroir de 12 m de diamètre, ce géant sera environ 100 fois plus lumineux que *Hubble* ! Comme il est impossible d'envoyer dans l'espace un miroir aussi grand, le *HDST* bénéficiera de la technique novatrice choisie pour le *JWST* : le miroir mosaïque repliable. Un challenge technique très risqué, que les astronomes espèrent voir relevé par le *JWST* quand il se déploiera en orbite en 2018… De fait, la mosaïque du *JWST* est composée de 18 petits miroirs de 1,3 m de largeur, pour un total de 6,5 m. Celle du *HDST* en comportera 54. Son objectif est précis : découvrir et étudier quelques dizaines (environ 50, selon les spécialistes) d'exoplanètes se situant dans la zone habitable de leur étoile, c'est-à-dire là où de l'eau peut se maintenir à l'état liquide à leur surface, comme c'est le cas sur Terre. Ensuite, les analyser, définir leurs caractéristiques avant de tenter d'y détecter des biomarqueurs, des composants atmosphériques qui pourraient être d'origine biologique… Ainsi, de la vapeur d'eau indiquerait la présence possible d'étendues d'eau liquide ; de l'oxygène, une possible forme de vie, car cet élément, sur Terre, est surtout produit par la photosynthèse. Bien sûr, il faudra étudier durant de nombreuses années ces candidates planètes vivantes, car le risque est grand de détecter de faux positifs, c'est-à-dire des planètes dont les biomarqueurs seraient d'origine chimique. Le méthane, par exemple, pourrait être dû, non pas à la présence d'êtres vivants, mais à l'oxydation de composés ferreux. L'oxygène pourrait aussi être produit de façon abiotique, par le contact d'oxyde de titane avec de l'eau… N'empêche ! En 2030, le *HDST* devrait photographier ces exoplanètes habitables ou habitées. Mais comme tous ses prédécesseurs, il n'obtiendra de ces mondes que des images de 1 pixel ! Jaune pour une planète-désert, bleu pour une planète-océan et vert pour une planète… vivante ?

NORTHROP GRUMMAN



∧ Constitué de milliers de télescopes de la taille de *Hubble,* l'*EEI* aurait un miroir virtuel de 400 km de diamètre. Une taille phénoménale qui permettrait enfin d'admirer les paysages des exoplanètes.



B. BOURGEOIS

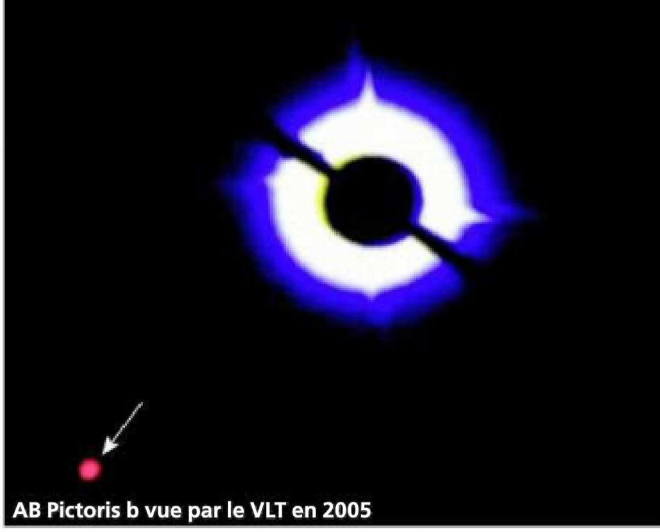
PAS AVANT 2040

Les observer au télescope spatial virtuel

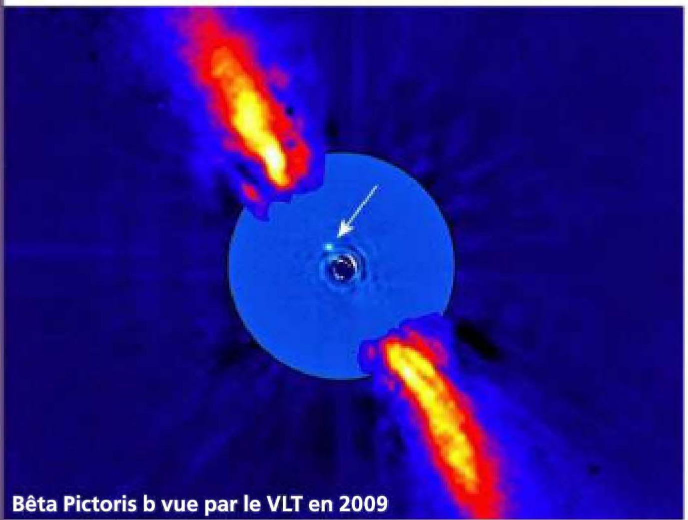
Comment voir des planètes situées à plusieurs dizaines d'années-lumière ? Grâce à un télescope spatial à miroir virtuel, un projet sensé et fou à la fois, de l'astronome français Antoine Labeyrie.



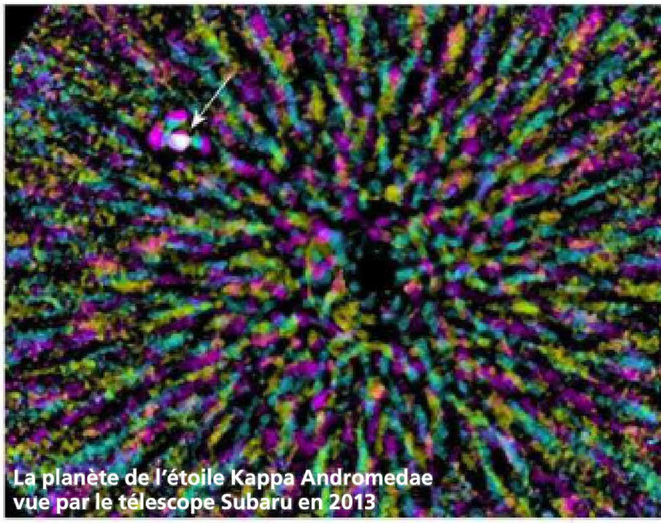
GQ Lupi b vue par le Very Large Telescope (VLT) en 2005



AB Pictoris b vue par le VLT en 2005



Bêta Pictoris b vue par le VLT en 2009



La planète de l'étoile Kappa Andromedae vue par le télescope Subaru en 2013

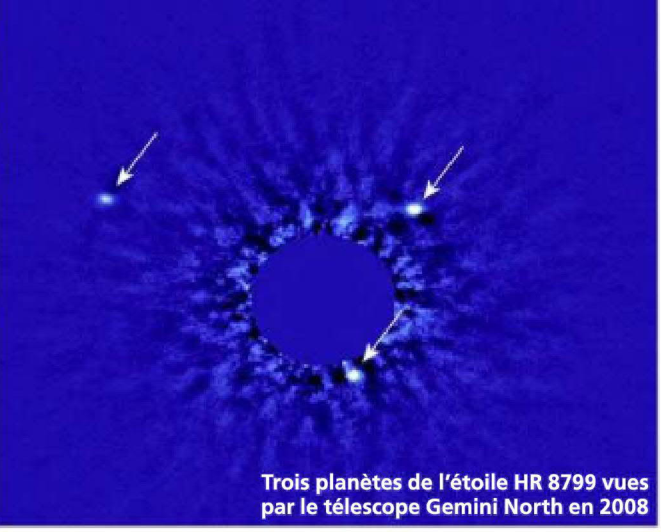
Les toutes premières images d'exoplanètes ont été obtenues à la fin de la décennie 2000. Dans dix ans, avec le E-ELT, le *JWST* et le *WFirst*, entre autres, des centaines d'entre elles auront été photographiées. Et, dans vingt ans, les astronomes disposeront enfin, grâce au *HDST*, d'images de planètes extrasolaires de taille comparable à celle de la Terre. Oui, mais en 2000 comme en 2030, malgré les progrès étourdissants de l'opto-électronique astronomique, ces mondes se révéleront juste sous l'aspect d'un point lumineux… En somme, les astronomes verront ces mondes lointains comme nous voyons les planètes proches du système solaire (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne) à l'œil nu, c'est-à-dire de minuscules points brillants dans la nuit, sans distinguer les anneaux de Saturne ni pouvoir suivre la météo de Mars et de Jupiter…

Dans notre système solaire, pour être observées en détail depuis la Terre, les planètes doivent être vues avec des télescopes de 20 à 30 cm de diamètre grossissant seulement 100 fois. Si une autre planète telle que la Terre existait, ces instruments nous permettraient de voir ses nuages, ses océans, ses étendues désertiques, ses montagnes, ses forêts, ses prairies, ses changements saisonniers… Et la vie y serait détectée immédiatement.

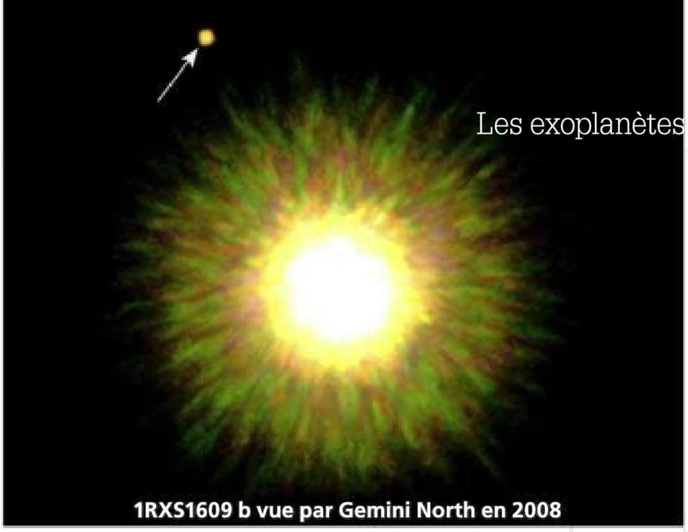
Alors comment faire pour contempler les planètes tournant autour d'autres étoiles avec la même précision ? En théorie, c'est lumineusement simple : sachant que la résolution d'une optique (c'est-à-dire sa capacité à discerner des détails sur l'objet observé) est directement fonction du diamètre de cette optique, il suffit de concevoir un télescope qui « ramène » les exoplanètes à la distance des planètes du système solaire.

UN TÉLESCOPE DE 200 KILOMÈTRES !

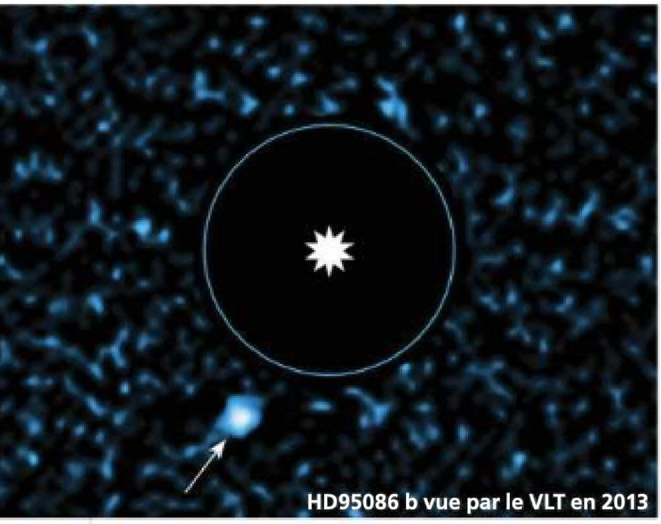
Une simple règle de trois permet de calculer le grossissement nécessaire et la taille du télescope capable de l'offrir : 200 kilomètres, pour un grossissement de 100 millions de fois ! Liées à la nature même de la lumière, les lois de l'optique sont irréductibles. Il n'y a aucun moyen de les contourner. S'ils désirent voir un jour la surface des planètes tournant autour d'autres étoiles à 20, 50 ou 100 années-lumière de nous, les astronomes devront donc concevoir un télescope mesurant, au moins, des dizaines de kilomètres, au mieux, des centaines de kilomètres !



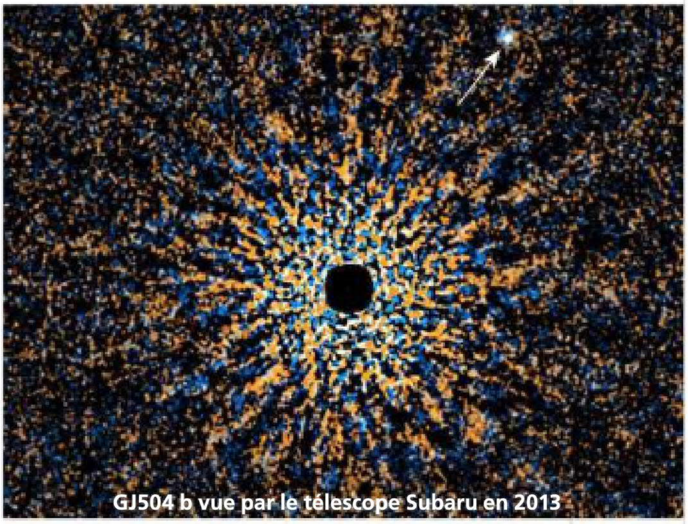
Trois planètes de l'étoile HR 8799 vues par le télescope Gemini North en 2008



1RXS1609 b vue par Gemini North en 2008



HD95086 b vue par le VLT en 2013



GJ504 b vue par le télescope Subaru en 2013

DES IMAGES ENCORE IMPRÉCISES

Détectées par imagerie infrarouge à proximité de leur étoile, les premières exoplanètes photographiées depuis 2004 ne sont encore que quelques points colorés.

Prenons l'exemple d'une planète terrestre distante de 30 années-lumière, qui aurait été observée pour la première fois par le télescope *WFirst* en 2025, et où la vie semblerait avoir été détectée en 2030 par le *HDST*. Avec ce dernier instrument, la planète apparaît comme un pixel lumineux dont la couleur varie très légèrement au cours de l'année, du fait de sa position par rapport à son étoile (elle présente des phases, comme la Lune) et du fait de possibles variations saisonnières. Les astronomes, les biologistes et l'humanité en général veulent savoir à quoi ressemble cette planète, ce qui se passe à sa surface, etc. En y envoyant une sonde spatiale ? Impossible ! Avec les techniques d'aujourd'hui, de demain et sans doute d'après-demain, un tel voyage durerait des dizaines de millénaires… Et même si – rêvons tout haut – une technologie miracle permettait de ramener ce voyage à seulement quelques décennies, il faudrait rajouter une durée incompressible de trente ans, une fois la sonde arrivée, pour enfin savoir ce qu'elle aurait découvert : le temps nécessaire à ce que ses informations reviennent sur Terre à la vitesse de la lumière. On le voit, le seul moyen d'observer une planète et ses possibles formes de vie dans un temps raisonnable, à échelle humaine, est de pointer vers elle un télescope hypergéant…

Envoyer une sonde spatiale vers une exoplanète est exclu : son voyage durerait des dizaines de millénaires…

Pour commencer à « résoudre » la planète, comme le disent les spécialistes, c'est-à-dire à la percevoir non plus comme un point, mais à tout le moins comme une minuscule bille lumineuse présentant des phases, il faudra utiliser un télescope de 20 kilomètres de diamètre grossissant 10 millions de fois ! Et pour contempler enfin sa surface avec quelques détails (continents, masses nuageuses, étendues d'eau, de neige, déserts, calottes polaires, étendues végétales…), il faudra cette fois un télescope de 100 à 200 kilomètres !



DU PIXEL AU PORTRAIT DÉTAILLÉ

Avec un instrument comme le *HDST,* une planète située à 30 années-lumière apparaîtra en 2030 comme un pixel lumineux. Pour la percevoir comme une bille lumineuse présentant des phases, il faudra un télescope de 20 kilomètres de diamètre. Et pour contempler enfin sa surface avec quelques détails (continents, masses nuageuses, étendues d'eau…), un télescope de 100 à 200 kilomètres. D'où le projet d'Antoine Labeyrie.

D. DIXON/NOVAPIX

Un miroir dont la surface serait polie avec une précision de quelques nanomètres et mesurant 200 kilomètres de diamètre, est-ce impossible ? Oui et non. Impossible, car depuis vingt ans, et pour l'avenir prévisible, les plus grands miroirs monolithiques, coulés et polis en un seul tenant, n'ont jamais dépassé 8 m de diamètre. Au-delà, les ingénieurs ont renoncé : la taille des fours et des cloches à vide pour couler le verre céramique, pour traiter la surface optique, la taille des conteneurs pour transporter les miroirs, le poids de ceux-ci (20 tonnes pour un miroir de 20 m) deviendraient prohibitifs. Et possible, malgré tout, car il existe un moyen de concevoir un miroir de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres sans rien perdre en précision : il suffit qu'il soit virtuel. Ou, selon l'expression d'Antoine Labeyrie, « dilué ».

Véritable pionnier, cet astronome et opticien français propose d'installer en effet dans l'espace un gigantesque télescope modulaire, appelé *Exo-Earth Imager (EEI)*, constitué de dizaines, puis de centaines, puis de milliers de petits télescopes individuels de la taille du télescope spatial *Hubble*. Cette flottille de télescopes formerait un interféromètre, c'est-à-dire un télescope virtuel, dont le diamètre équivaut à la distance maximale entre les petits télescopes. Chaque télescope représentera un morceau du miroir virtuel géant. Le miroir dilué de Labeyrie aura la même précision qu'un miroir réel de même taille, mais pas sa sensibilité, la surface optique du télescope virtuel étant bien moindre que celle d'un miroir réel. Mais cette limitation n'est pas importante pour observer des exoplanètes : des photographies pourront être prises en une heure de temps de pose seulement !

Des interféromètres existent déjà dans les domaines optique, infrarouge et radio. En optique et infrarouge, qui intéressent l'observation des exoplanètes, ces instruments comptent aujourd'hui six à huit petits télescopes, dessinant un miroir virtuel de 100 à 400 m de diamètre. De là à installer une constellation de dizaines, voire de centaines ou même de milliers de télescopes de type *Hubble* tous reliés entre eux… On mesure ici l'abîme technologique à combler pour réaliser le rêve d'Antoine Labeyrie. L'*EEI* est un instrument si ambitieux et coûteux qu'il ne sera probablement financé que si les générations de télescopes précédentes (dont l'E-ELT, le *JWST* et le *HDST*) détectent des planètes habitables ou habitées dans la galaxie. De fait, seule l'observation d'un monde habité permettra à ce rêve technoscientifique à 20 ou 30 milliards d'euros de voir le jour, peut-être au cours de la décennie 2040 ou 2050.

Seule l'observation d'un monde habité permettra à ce rêve technoscientifique à 20 30 milliards d'euros de voir le jour



Un projet d'une élégance et d'une simplicité formelle géniales. En effet, l'*EEI* observerait finalement le ciel entier, et continûment. Dans sa version ultime, il dessinerait une sphère de 400 kilomètres de diamètre, dont la surface virtuelle serait ponctuée de 10 000 télescopes de la taille de *Hubble*. L'*EEI* serait fixe dans l'espace, et ses télescopes orientés perpétuellement dans la même direction, leur axe de visée réglé sur le centre de la sphère. Celuici contiendrait une seconde sphère constituée de satellites « focaux », qui recevraient les données des télescopes individuels. Observant toutes les directions de la sphère céleste, l'ensemble du miroir pourrait pointer des dizaines de cibles différentes.

UN PIONNIER DE L'INTERFÉROMÉTRIE

Un projet qui est aussi, et tout à la fois, raisonnable et fou. Raisonnable, parce que la technologie de ces télescopes spatiaux individuels est maîtrisée depuis quarante ans et parce que la technologie interférométrique, quoique terriblement complexe et difficile à mettre en œuvre, est utilisée par les astronomes depuis les travaux pionniers d'Antoine Labeyrie dans les années 1980. Et fou, car l'échelle à laquelle il faut projeter ces techniques est tout bonnement extraordinaire. L'intérêt décisif du concept interférométrique de l'*EEI* est que l'instrument fonctionnera et commencera à offrir des données scientifiques dès que cinq ou six télescopes seront en orbite, probablement au point de Lagrange L_2, une orbite solaire très stable, située au-delà de la Lune, à 1 million de kilomètres de la Terre. En effet, cinq ou six *Hubbles* mis en phase, éloignés de quelques centaines de mètres les uns des autres, pourront déjà observer les astres (étoiles, trous noirs, quasars…) avec une précision jamais vue. Puis, avec l'ajout de télescopes, le miroir dilué augmentant progressivement de taille, les exoplanètes se révéleront peu à peu, puis leurs lunes, leurs anneaux, leur atmosphère, leurs océans, leurs déserts, leurs montagnes…

Quoi qu'il en soit, si dans les décennies qui viennent les astronomes découvrent des mondes habités, l'humanité voudra les voir. Alors le rêve fou d'Antoine Labeyrie se réalisera. ●



DOMPTER L'ENFER DE VÉNUS

Par Pierre-Yves Bocquet



MISSION VERITAS (NASA)

2021

Ce projet de sonde spatiale prévoit de cartographier finement la surface de Vénus, d'en analyser la composition chimique et d'y rechercher de l'eau.

MISSION DAVINCI (NASA) ET PROJET VENERA-D (RUSSIE)

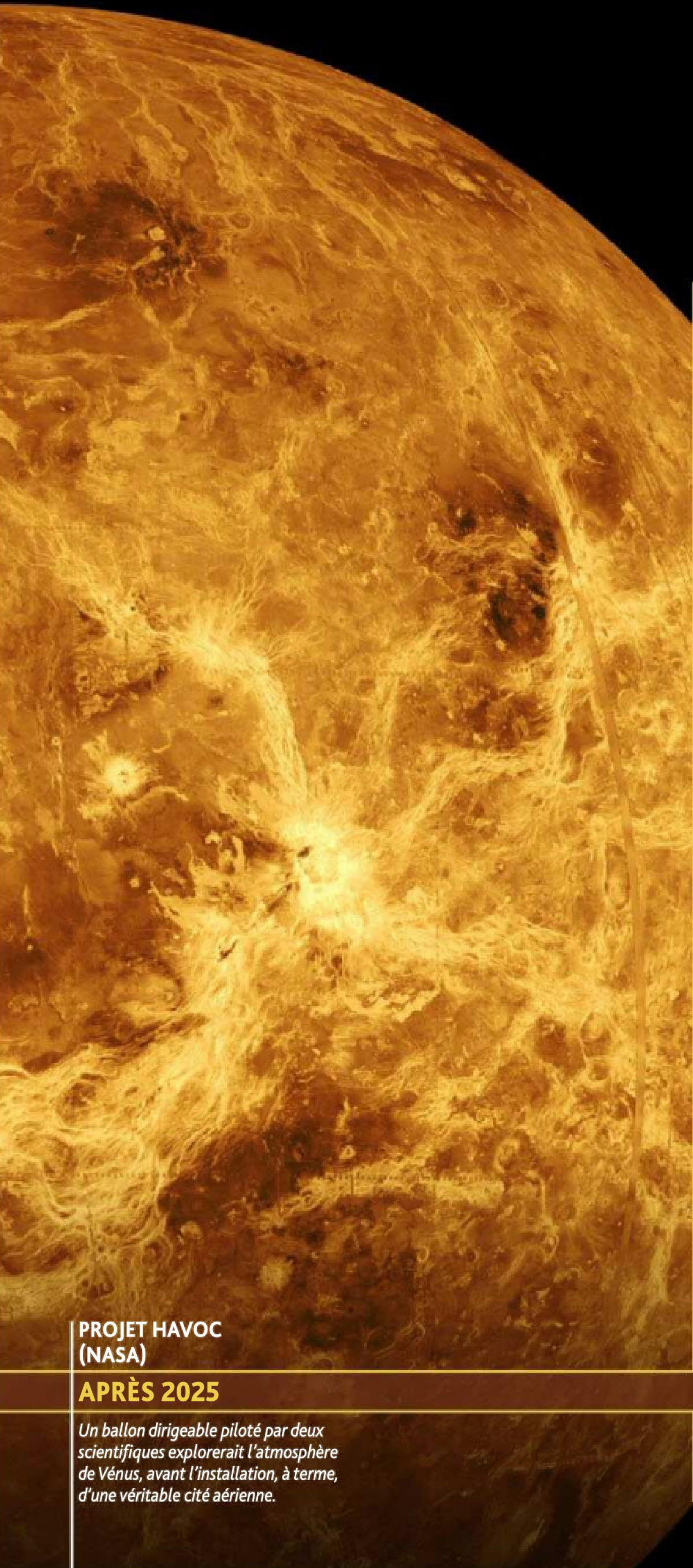
2021 ET 2024

En compétition avec Veritas, le projet Davinci ambitionne – tout comme le projet russe – d'analyser la composition de l'atmosphère vénusienne.

PROJET VAMP (NORTHROP GRUMMAN, L'GARDE/NASA)

PAS AVANT 2021

S'il est retenu par le programme New Frontiers de la Nasa, ce drone gonflable pourrait voler pendant un an dans le ciel de Vénus.



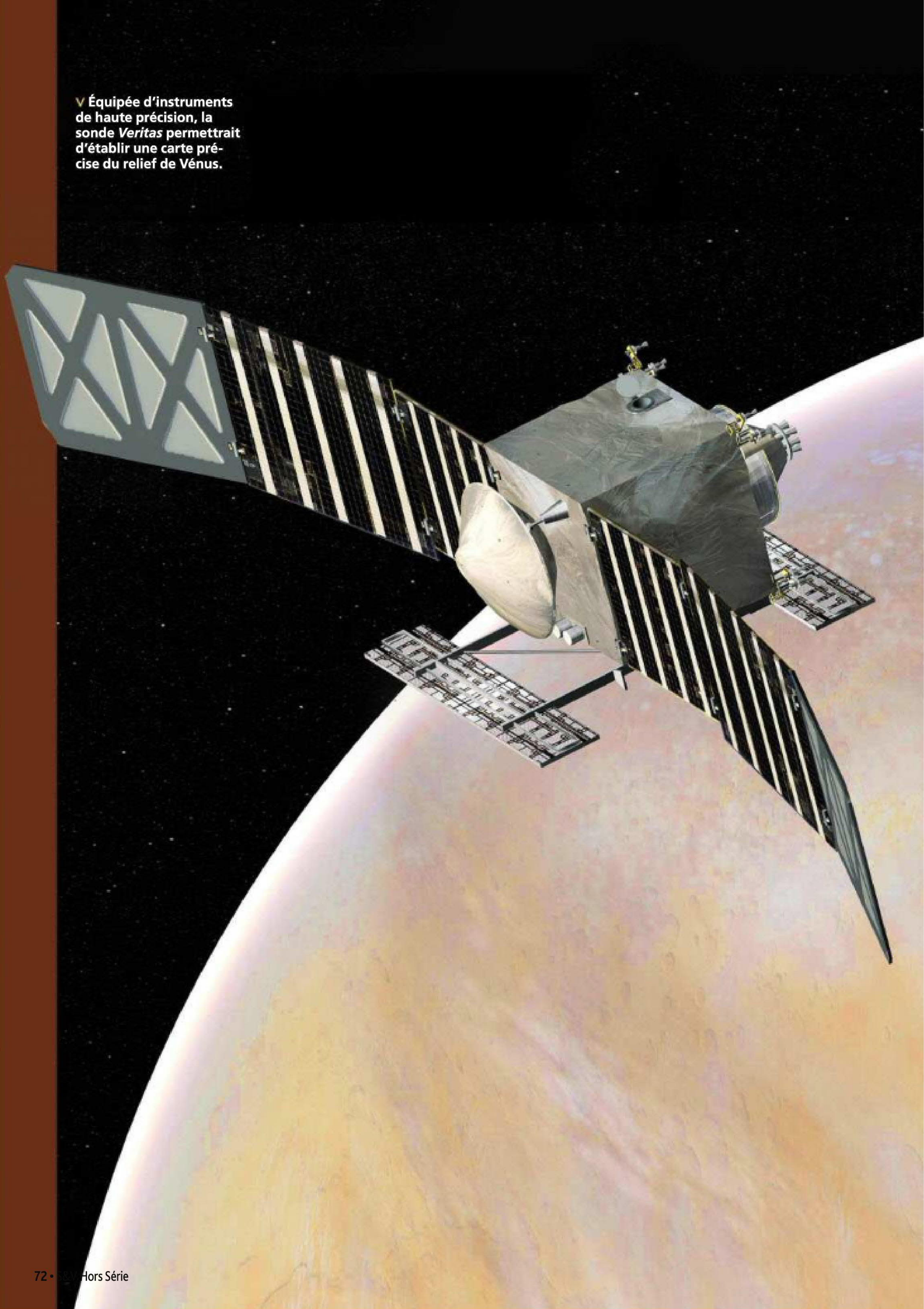
PROJET HAVOC (NASA)

APRÈS 2025

Un ballon dirigeable piloté par deux scientifiques explorerait l'atmosphère de Vénus, avant l'installation, à terme, d'une véritable cité aérienne.

Troisième objet le plus brillant dans le ciel, après le Soleil et la Lune, Vénus est la première planète vers laquelle des engins spatiaux ont été lancés. Car la mal nommée étoile du Berger intéresse les astronomes depuis l'Antiquité. Les similitudes de diamètre (5 % plus petit pour Vénus), de masse (19 % inférieure), de gravité et d'âge en ont longtemps fait la jumelle de sa voisine la Terre… Une ressemblance qui n'est que superficielle. Mesurée en 1962 par la sonde américaine Mariner 2, sa température de surface – près de 470 °C ! – est l'une des plus infernales du système solaire. Depuis, de nombreuses missions (dont l'européenne Venus Express) ont été menées, sans lever complètement le voile qui entoure la planète : pourquoi les conditions y sont-elles si différentes de celles de la Terre ? Ses volcans sont-ils encore actifs ? Pourquoi n'a-t-elle pas de tectonique des plaques ? Pourquoi tourne-t-elle sur elle-même dans le sens inverse des autres planètes ? Autant de questions qui motivent les futures missions vers Vénus.

JPL/NASA



∨ **Équipée d'instruments de haute précision, la sonde *Veritas* permettrait d'établir une carte précise du relief de Vénus.**

2021

Cartographier sa surface

Malgré sa proximité avec la Terre, Vénus n'est pas facile à observer : son atmosphère abrite une couche de nuages de plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur qui réfléchit fortement la lumière (d'où son nom d'étoile du Berger). Résultat : il est quasiment impossible d'en observer la surface à l'aide de télescopes depuis la Terre.
Il a donc fallu attendre l'envoi des premières sondes dans les années 1960 pour découvrir enfin à quoi ressemble notre voisine.
En 1990, la sonde américaine *Magellan* a pu cartographier plus de 90 % de sa surface. Elle a ainsi permis de découvrir que celle-ci comporte des stigmates d'impacts de météorites et d'importantes traces d'activité volcanique, dont de vastes plaines de lave. Elle a aussi mis en évidence que, malgré sa structure tellurique (elle est dotée d'une croûte solide comme la Terre), Vénus ne présente pas de tectonique des plaques.
Mais la résolution des mesures de *Magellan* (150 m) est insuffisante pour étudier plus finement sa dynamique géologique. D'où l'objectif du projet Veritas (Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography and Spectroscopy) de la Nasa, qui prévoit la mise en orbite autour de Vénus d'une sonde équipée d'instruments capables de cartographier sa surface avec une résolution de 15 à 30 m. Il sera ainsi possible d'établir précisément une carte de son relief, et également d'en mesurer la composition chimique, afin de mieux comprendre son évolution géologique.
La mission sera également chargée de rechercher la présence d'eau sur la planète. Elle pourra peut-être aussi lever le voile sur l'une des particularités de Vénus : les *tesserae*, des formations géologiques ressemblant à des tuiles qui réfléchissent fortement les ondes radar (ce qui les rend très brillantes) et qui n'ont, à ce jour, été observées sur aucune autre planète. On suppose qu'elles sont dues à la compression de terrains anciens, leur donnant cet aspect plissé, mais leur formation, leur structure et leur composition chimique restent mal comprises. On en dénombre plusieurs sur Vénus, dont la plus grande s'étend sur presque 3 000 km de longueur !
Le projet Veritas fait partie des cinq missions retenues par la Nasa parmi lesquelles sera sélectionnée la treizième mission de son programme Discovery. Le choix définitif est attendu en septembre 2016, pour un lancement en 2021.

2021 ET 2024

Analyser son atmosphère

Le projet Davinci (Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry and Imaging), actuellement à l'étude à la Nasa, a pour objectif de mieux connaître la composition de l'atmosphère de Vénus. Cette dernière a, il est vrai, déjà fait l'objet de nombreuses études, depuis les toutes premières sondes envoyées vers la planète : *Mariner 2* en 1962, et le programme russe Venera dans les années 1960 et 1970.
Ces premières mesures ont montré que la planète est entourée d'une atmosphère très majoritairement constituée de dioxyde de carbone (à 96,5 %), à l'origine d'un puissant effet de serre qui explique en partie les conditions extrêmes (470 °C et 93 bars) qui règnent à sa surface. Elles ont également révélé que son atmosphère contient de l'azote et de l'acide sulfurique, et qu'elle est animée par de vastes mouvements en altitude, avec des vents pouvant dépasser les 500 km/h ! Mais la basse couche de son atmosphère, la plus proche de la surface, sur les 20 premiers kilomètres d'altitude, reste mal connue, la plupart des sondes envoyées n'ayant pas résisté plus de quelques minutes aux extrêmes conditions qui y règnent.
C'est précisément l'objet du projet Davinci : larguer dans l'atmosphère vénusienne une sonde équipée d'un parachute et profiter de sa descente de 63 minutes vers le sol pour engranger ces données manquantes. Cela permettra peut-être de comprendre enfin comment cette atmosphère s'est formée, quelle est sa dynamique à basse altitude, et pourquoi son évolution est si différente de celle de la Terre.
Comme le projet Veritas, Davinci est en lice pour être la future mission du programme Discovery.
Avec Venera-D (l'extension des programmes Venera et Vega), dont le lancement est prévu pour 2024, les Russes ambitionnent eux aussi d'étudier l'atmosphère de Vénus, à deux altitudes distinctes, grâce à deux ballons météo. Ils espèrent également pouvoir analyser sa surface au moyen d'un atterrisseur d'une durée de vie de une heure.

JPL-CALTECH/NASA



> Drone gonflable de 55 m d'envergure fonctionnant à l'énergie solaire, le Vamp pourrait étudier l'atmosphère de Vénus pendant un an !

PAS AVANT 2021

Y envoyer un drone

L'atmosphère de Vénus intrigue depuis longtemps les astronomes. Comment une planète aussi proche de la Terre peut-elle avoir une atmosphère aussi différente et aussi hostile ? L'air vénusien est en effet composé à plus de 96 % de dioxyde de carbone, avec une épaisse et opaque couche de nuages d'acide sulfurique. Mieux comprendre sa formation et son évolution permettrait d'éclairer l'origine de l'atmosphère terrestre et faciliterait l'étude d'exoplanètes présentant des similitudes avec cet environnement.
Sauf que pour mieux caractériser cette atmosphère, il faudrait en mesurer des paramètres à différents endroits et à différentes altitudes sur une longue période. Un challenge vu les conditions qui y règnent !
Jusqu'ici, les données parcellaires dont nous disposons ont été récoltées par quelques sondes spatiales (*Venera, Magellan, Venus Express*…) et par les quelques atterrisseurs qui se sont risqués sur son sol. Mais dans les deux cas, les possibilités de mesures étaient limitées. En orbite, seuls les radars arrivent à percer la couche de nuages. Quant aux atterrisseurs, ils n'ont qu'une soixantaine de minutes pour effectuer des analyses atmosphériques, le temps de leur descente jusqu'au sol, et quelques minutes pour envoyer leurs mesures : la durée de vie d'un objet dans l'enfer vénusien n'a jamais dépassé deux heures ! Mais l'appareil imaginé par le fabricant américain Northrop Grumman pourrait bien révolutionner l'exploration vénusienne.
Cet engin gonflable sans pilote, en forme d'aile delta de 55 m d'envergure et fonctionnant à l'énergie solaire, pourrait sillonner le ciel de Vénus pendant un an ! Baptisé Vamp (pour Venus Atmospheric Maneuverable Platform), ce drone s'appuie sur les particularités de Vénus pour en tirer le meilleur parti. À commencer par la densité de son atmosphère, 50 fois supérieure à celle de l'air terrestre. D'où un engin plus léger que l'air ambiant.
« Sur Vénus, vu la densité de l'atmosphère, le principe d'Archimède est très favorable. Des gaz comme la vapeur d'eau qui, sur Terre, ne seraient pas assez légers pour faire voler un engin, sont utilisables. Ce qui évite d'avoir recours à des gaz légers comme l'hélium ou l'hydrogène, difficiles à mettre



en œuvre et enclins à générer des fuites », explique Francis Rocard, responsable des projets d'exploration du système solaire au Cnes. Le scénario imaginé Northrop Grumman et son partenaire L'Garde (spécialiste des structures aérospatiales gonflables) consiste d'abord à envoyer un lanceur vers Vénus. Une fois ce dernier en orbite, le Vamp est alors déployé et gonflé, tout en restant arrimé au vaisseau mère.

PILOTÉ DEPUIS LA TERRE

Il est ensuite largué dans l'atmosphère vénusienne, où il entame sa descente vers le sol. L'entrée dans l'atmosphère est une étape critique : le Vamp doit résister à la chaleur due aux frottements, plusieurs centaines de degrés ! Ainsi, le bord d'attaque des ailes du drone est composé de matériaux thermorésistants (le Nextel, un tissu à base de céramique, et le Pyrogel, un isolant surpuissant) pouvant résister à 1200 °C ! Une fois dans l'atmosphère et ralenti par les frottements, le drone-dirigeable active alors sa propulsion et entame son vol, piloté depuis la Terre grâce à des ailerons et des gouvernes mobiles. Objectif : éviter la fournaise de la basse altitude et évoluer dans les couches de nuages moyenne (52-54 km) et supérieure (65-68 km) pour y effectuer des mesures, à une vitesse maximale de 30 mètres par seconde (soit 108 km/h).
Propulsé par deux hélices, le Vamp pourrait sillonner le ciel vénusien pendant un an (Northrop Grumman prévoit de recouvrir la surface de l'aéronef de téflon pour la protéger du très corrosif acide sulfurique présent dans les nuages). *« L'intérêt du projet, c'est qu'un même véhicule rentre dans l'atmosphère à très grande vitesse, puis qu'il ralentisse et devienne un drone-dirigeable »,* analyse Francis Rocard. La portance naturelle permet d'économiser l'énergie, qui est utilisée pour la propulsion, mais pas pour la sustentation de l'appareil. Cette méthode dispense aussi d'utiliser un lourd bouclier thermique, habituellement nécessaire pour protéger le véhicule de l'échauffement. La masse ainsi économisée, de l'ordre de 50 kg selon Northrop Grumman, peut être utilisée au profit des instruments de bord (spectromètre de masse, caméras, microscope optique...).

NORTHROP GRUMMAN - GETTY



SMAB/NASA

APRÈS 2025

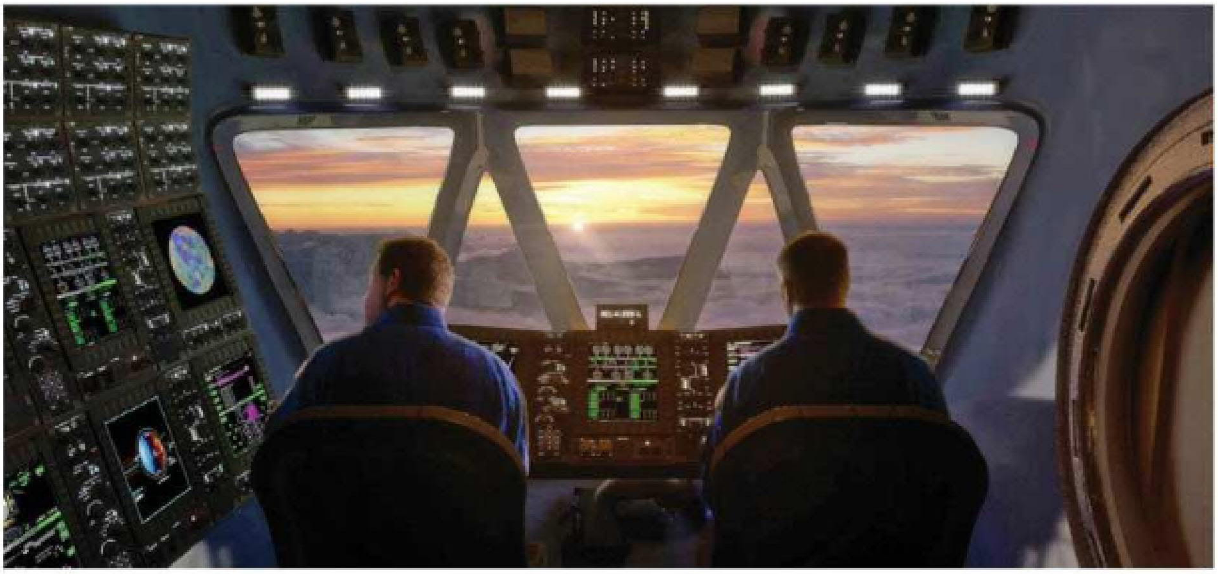
Y construire une cité aérienne

Avec des températures extrêmes et une pression phénoménale, la surface de Vénus restera vierge de tout pas humain pendant encore longtemps. Mais son atmosphère, plus vivable, pourrait accueillir une cité aérienne.

Vu sa proximité avec la Terre (38 millions de kilomètres au plus près), Vénus devrait être en tête de liste des planètes que l'humanité prévoit d'explorer, et non pas Mars (au mieux à 55 millions de kilomètres). Mais comment envoyer des humains explorer une planète quand on ne peut pas s'y poser ? Non qu'elle soit dépourvue de plancher des vaches : Vénus est une planète tellurique, c'est-à-dire dotée d'une croûte solide en surface, comme la Terre et Mars. Pourtant, l'homme n'est pas prêt d'y mettre le pied ! L'environnement vénusien figure, en effet, parmi les plus hostiles que nous connaissions. Un véritable enfer ! La température de surface (470 °C en moyenne) est la plus élevée de toutes les planètes

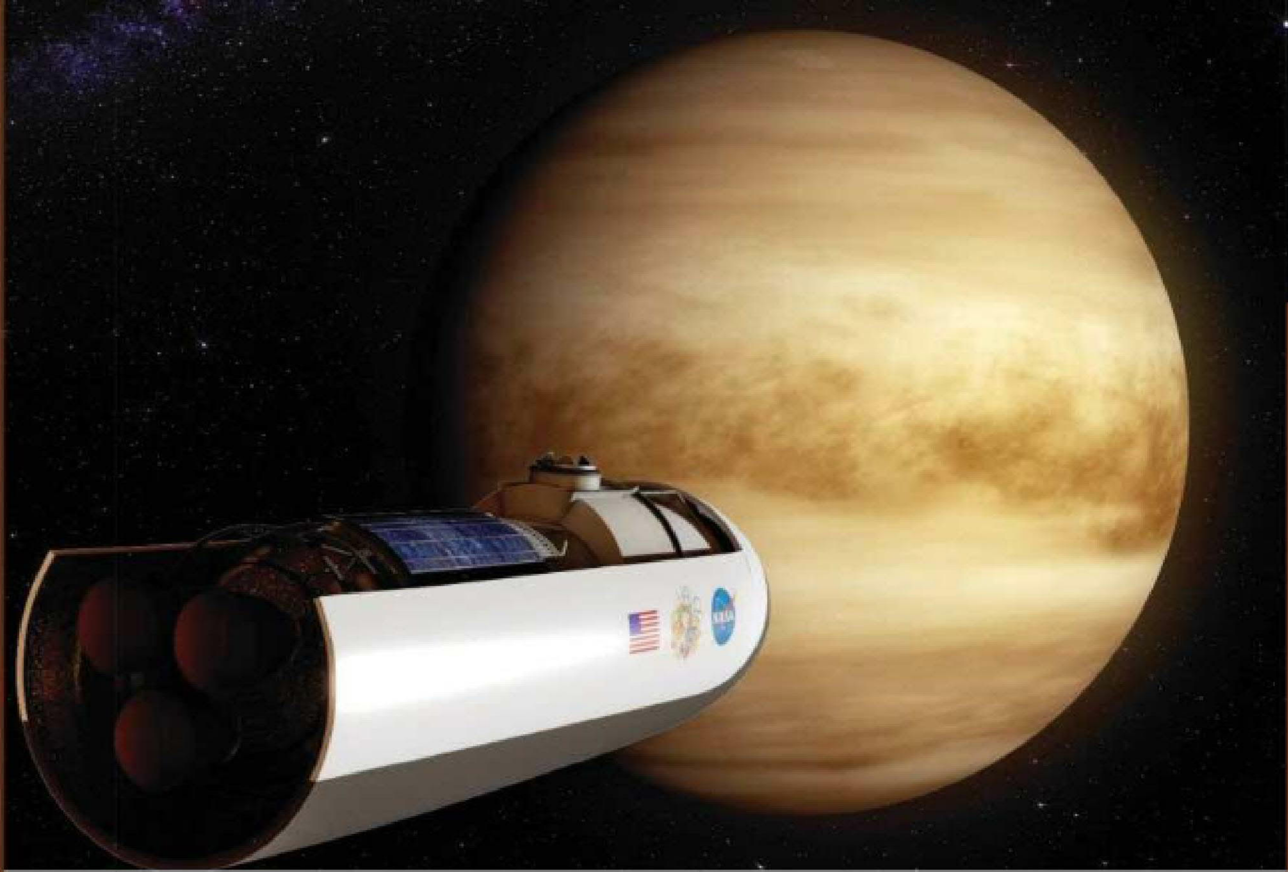


Selon le projet de la Nasa, un premier dirigeable accueillerait une équipe de deux scientifiques, avant que de plus gros ballons abritent une colonie permanente.



du système solaire. Elle est supérieure à celle de Mercure (420 °C), pourtant la plus proche du Soleil, et dépasse même la température de fusion du plomb (327 °C) et du zinc (419 °C). L'origine de ce microclimat : une atmosphère riche en dioxyde de carbone (96 %), responsable d'un puissant effet de serre. Comme si cela ne suffisait pas, son atmosphère est si dense que la pression qui règne au niveau du sol est hors du commun : elle dépasse 90 bars, un niveau lui aussi inégalé dans le système solaire. À titre de comparaison, c'est la pression que subirait un plongeur à 900 m de profondeur ! Aucun homme ne résisterait à un tel cauchemar : le record mondial de plongée en combinaison avec bouteilles et sans assistance n'est que de 332 m.

« Vénus, c'est un peu la planète maudite : les conditions y sont telles qu'elle sera très difficile à explorer. Y envoyer un rover n'est même pas un projet », résume Francis Rocard, responsable des projets d'exploration du système solaire au Cnes. Car ces terribles conditions ne le sont pas que pour l'homme : l'espérance de vie des engins spatiaux (pourtant conçus pour résister à un environnement extrême) sur le sol de Vénus ne dépasse pas une vingtaine de minutes en moyenne (voir encadré p. 79). Il existe pourtant peut-être une solution pour approcher Vénus au plus près, en toute sécurité : se réfugier prudemment en altitude, où règnent des conditions beaucoup plus favorables. À 50 kilomètres de hauteur, la pression devient équivalente



à celle qui règne sur Terre (1 bar), pour une température de 75 °C. Un niveau certes élevé, mais seulement de 18 °C supérieur aux températures les plus chaudes enregistrées sur Terre, dans la Vallée de la Mort, en Californie.

UNE ATMOSPHÈRE PROTECTRICE

L'endroit présente d'autres avantages de taille pour une mission habitée. La gravité y est à peine inférieure à celle de la Terre et l'atmosphère de Vénus est si dense qu'elle parviendrait à protéger les explorateurs des effets nocifs du rayonnement cosmique. Émis dans l'espace par les étoiles, ce flux de particules à haute énergie peut, à forte dose d'exposition, engendrer de graves conséquences sur la santé. Il est donc un facteur extrêmement limitant pour la durée des missions spatiales habitées, sauf si, comme sur Terre, ce flux est dévié par un champ magnétique (dont Vénus est dépourvue) ou piégé par une atmosphère. Enfin, grâce à la proximité de Vénus avec le Soleil, l'énergie solaire disponible pour alimenter des panneaux photovoltaïques est de 40 % supérieure à celle disponible sur Terre.

Bref, si le sol de Vénus est un enfer, son atmosphère, elle, s'apparente à un petit paradis. *« À 50 kilomètres d'altitude, l'atmosphère de Vénus devient l'un des lieux les plus accueillants de l'Univers pour l'homme, après la Terre »,* confirme Francis Rocard. C'est à partir de ce constat que la division d'analyse des missions spatiales de la Nasa (la Smab) a échafaudé un projet qui semble tout droit sorti d'un roman de Jules Verne ou d'un film de Hayao Miyazaki : une cité suspendue dans le ciel de Vénus, à 50 kilomètres au-dessus du sol, constituée d'énormes ballons dirigeables. Regroupés en grappes, ces ballons formeraient une base volante qui accueillerait, dans un premier temps, une équipe de deux scientifiques pendant un an. À terme, elle pourrait même abriter une colonie humaine permanente, selon le scénario en plusieurs étapes imaginé par la Nasa.

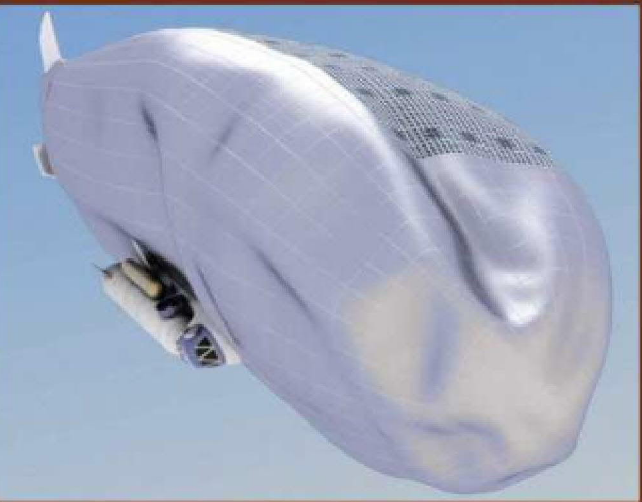
Le ballon emportera une charge utile de 70 tonnes : une cabine d'habitation et, surtout, une fusée pour le retour vers la Terre

Après des missions préliminaires d'exploration robotisée et habitée, en orbite et dans l'atmosphère, le concept Havoc (High Altitude Venus Operational Concept) prévoit la fabrication d'un véhicule d'exploration : un ballon dirigeable de 130 mètres de long (environ la moitié du *Hindenburg*, détruit par les flammes en 1937) pouvant emporter une charge utile de 70 tonnes : à savoir une cabine d'habitation de 21 m³ pour les explorateurs, mais surtout une fusée à deux étages pour les remettre en orbite vénusienne, en vue du retour vers la Terre. Le ballon serait également équipé d'un vaste panneau solaire de 1 000 m² sur sa face supérieure, pour fournir l'électricité nécessaire à l'équipage et au matériel scientifique.

SMAB/NASA

LA NÉCESSITÉ D'UN LANCEUR XXL

Plié dans une capsule, le ballon de 130 m de long se gonflera une fois dans l'atmosphère vénusienne. Mais pour l'instant, aucun lanceur n'est assez puissant pour un tel chargement…



Mais comment emmener un dirigeable jusque dans le ciel de Vénus ? La première partie du voyage est classique : un lanceur le met sur orbite vénusienne, plié dans une capsule. Cette dernière peut ensuite effectuer une entrée dans l'atmosphère à la vitesse vertigineuse de 7200 m/s, protégée des échauffements par un bouclier thermique. Freinée par les frottements et par un parachute, la capsule s'ouvrirait ensuite pour libérer le dirigeable à une altitude de 76 kilomètres. Suffisamment ralenti, ce dernier serait alors déployé et gonflé grâce à un gaz plus léger que l'air ambiant. C'est l'avantage de Vénus : son atmosphère très dense permet d'utiliser comme gaz porteur des molécules moins légères, moins dangereuses et moins sensibles aux fuites que l'hélium ou l'hydrogène utilisés sur Terre. *« L'air lui-même est un gaz porteur à ces altitudes,* souligne Chris Jones, coleader du projet à la Smab, dans une interview au site spécialisé Universe Today. *Et nous pourrons potentiellement fabriquer cet air sur place en retraitant le dioxyde de carbone ambiant. »* Une fois gonflé et autoporteur, l'aéronef peut alors entamer son périple à 50 kilomètres d'altitude autour de Vénus. Poussé par des vents de 100 m/s (360 km/h) au niveau de l'équateur, il lui faudra environ 110 heures pour faire le tour de la planète.

À plus long terme, la même technique pourrait être répétée pour créer une base permanente. Des ballons dirigeables quatre à cinq fois plus grands, accueillant de véritables habitations sous leur ventre, formeraient une cité aérienne capable d'abriter une colonie de plusieurs dizaines de personnes. De la pure science-fiction ? Selon la Smab, le projet ne nécessite aucune réelle rupture technologique. Plusieurs études de faisabilité ont d'ailleurs déjà été menées pour valider les réponses apportées aux deux principaux défis du projet : l'utilisation d'un revêtement en téflon pour protéger l'enveloppe du dirigeable contre l'acide sulfurique présent en quantité dans les nuages de Vénus ; et la possibilité de plier et de déployer l'enveloppe d'un tel dirigeable, en partie recouvert de panneaux solaires, testée sur une maquette à l'échelle 1/50.

UNE PREMIÈRE ÉTAPE AVANT MARS ?

Le principal frein technologique est en fait lié au lanceur : aucune fusée n'est pour l'instant capable d'emporter un tel chargement jusqu'à Vénus. Il faudra attendre la version II du lanceur américain *Space Launch System*, prévue pour 2027. En cours de développement, le *SLS* est programmé pour aller sur Mars. Mais rien ne l'empêcherait d'être utilisé pour aller sur Vénus, souvent plus proche de la Terre que la planète rouge. Ce serait un galop d'essai avant la grande odyssée martienne.

Des hommes auront ainsi peut-être un jour le plaisir de contempler un spectacle inédit : un coucher de soleil à l'Est, Vénus tournant sur elle-même dans le sens inverse de la plupart des autres planètes. Une scène d'autant plus rare qu'à cause de sa faible vitesse de rotation, la journée sur Vénus équivaut à 117 jours terrestres. La présence d'un homme dans le ciel vénusien sera alors la preuve que l'humanité a franchi une nouvelle frontière, comme le premier pas sur la Lune en son temps. Un petit vol pour l'homme… ●

LE SOL VÉNUSIEN: UN ENFER!

Les conditions de température et de pression sur Vénus font de sa surface l'un des endroits les plus hostiles du système solaire. À partir des années 1960, le programme russe Venera a envoyé vers la planète une quinzaine de sondes, dont certaines comportant des atterrisseurs, parachutés dans l'atmosphère dans l'espoir qu'ils se posent sur le sol. Plusieurs ont explosé à plusieurs dizaines de kilomètres de la surface sous l'effet de la pression. Le premier à y parvenir, en 1970, *Venera 7,* n'y a survécu que 23 minutes. Le record étant détenu par *Venera 12,* en 1978, qui réussit à envoyer des informations vers sa sonde orbitale pendant 110 minutes, avant que celle-ci ne passe derrière la planète et ne puisse plus les recevoir. L'atterrisseur est ensuite resté muet, probablement vaporisé, sans que l'on sache combien de temps il a vaillamment résisté à l'enfer vénusien.



ATTEINDRE LES ÉTOILES

PAR PIERRE-YVES BOCQUET

LE LANCEUR *SPACE LAUNCH SYSTEM* (NASA)

2018

Plus grande fusée jamais construite, ce nouveau lanceur à propulsion chimique a été conçu pour emmener des hommes sur Mars.

LE MOTEUR VASIMR (AD ASTRA ROCKET)

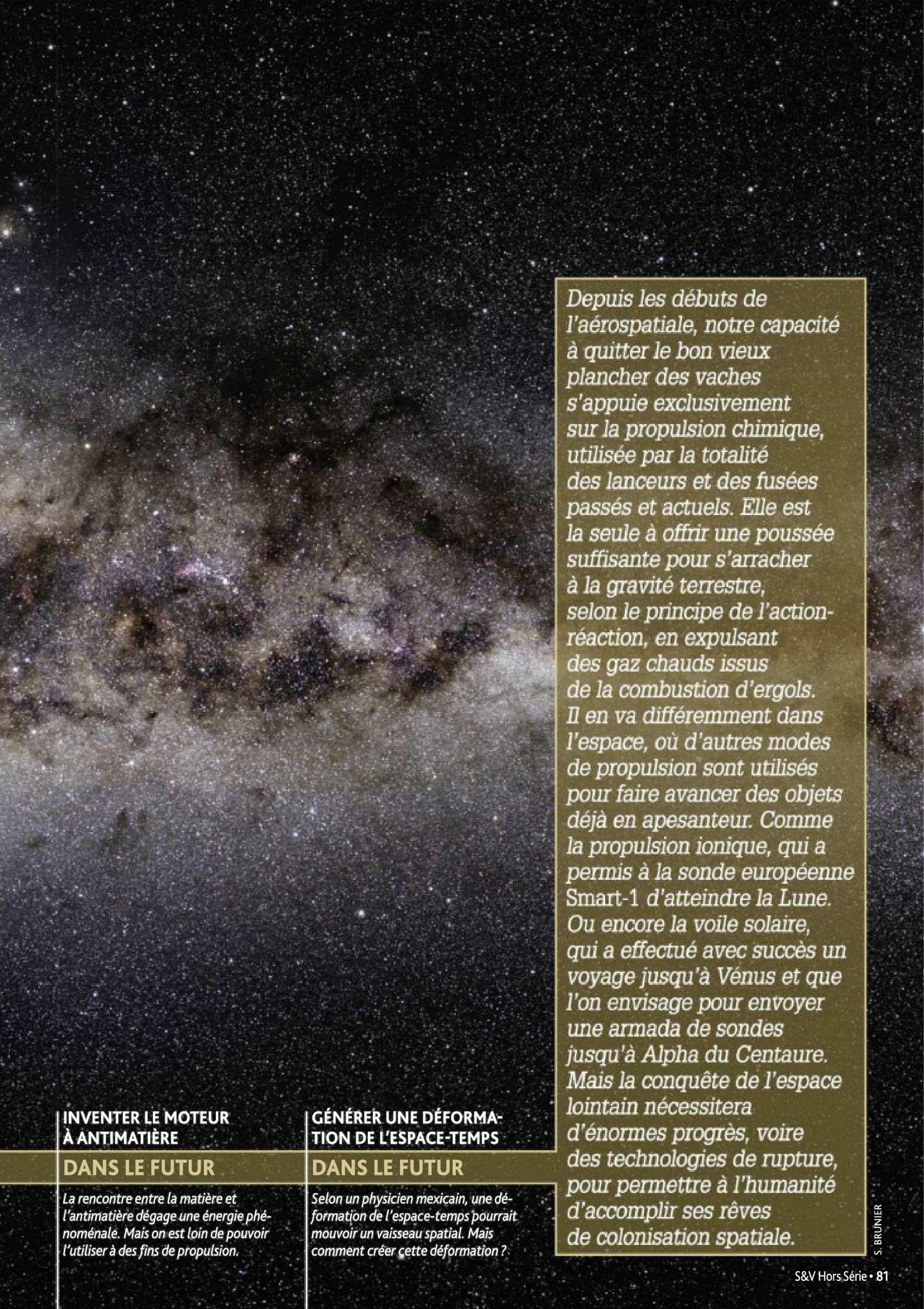
2018

Alors que des moteurs ioniques propulsent des sondes déjà dans l'espace, VASIMR, un moteur magnéto-plasmique, devrait être bientôt testé.

LIGHTSAIL 2 (ÉTATS-UNIS) ET L'*E-SAIL* (FINLANDE)

2016, 2017 ET 2020

Testées prochainement, ces voiles solaires (dont une électrique) pourraient ouvrir la voie à des missions d'exploration très lointaines.



S. BRUNIER

Depuis les débuts de l'aérospatiale, notre capacité à quitter le bon vieux plancher des vaches s'appuie exclusivement sur la propulsion chimique, utilisée par la totalité des lanceurs et des fusées passés et actuels. Elle est la seule à offrir une poussée suffisante pour s'arracher à la gravité terrestre, selon le principe de l'action-réaction, en expulsant des gaz chauds issus de la combustion d'ergols. Il en va différemment dans l'espace, où d'autres modes de propulsion sont utilisés pour faire avancer des objets déjà en apesanteur. Comme la propulsion ionique, qui a permis à la sonde européenne Smart-1 d'atteindre la Lune. Ou encore la voile solaire, qui a effectué avec succès un voyage jusqu'à Vénus et que l'on envisage pour envoyer une armada de sondes jusqu'à Alpha du Centaure. Mais la conquête de l'espace lointain nécessitera d'énormes progrès, voire des technologies de rupture, pour permettre à l'humanité d'accomplir ses rêves de colonisation spatiale.

INVENTER LE MOTEUR À ANTIMATIÈRE

DANS LE FUTUR

La rencontre entre la matière et l'antimatière dégage une énergie phénoménale. Mais on est loin de pouvoir l'utiliser à des fins de propulsion.

GÉNÉRER UNE DÉFORMATION DE L'ESPACE-TEMPS

DANS LE FUTUR

Selon un physicien mexicain, une déformation de l'espace-temps pourrait mouvoir un vaisseau spatial. Mais comment créer cette déformation ?

2018

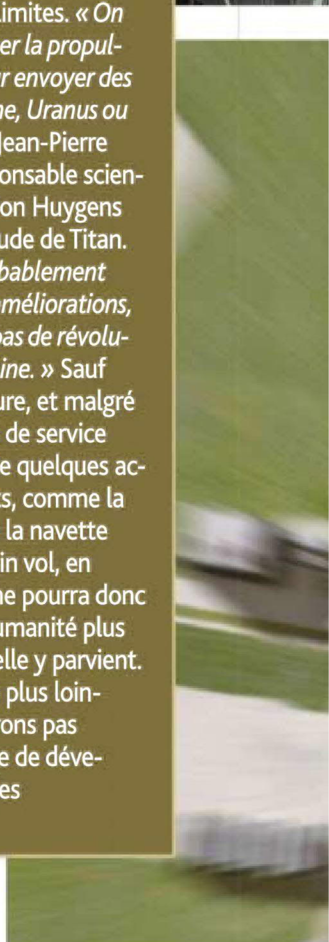
Optimiser la propulsion chimique

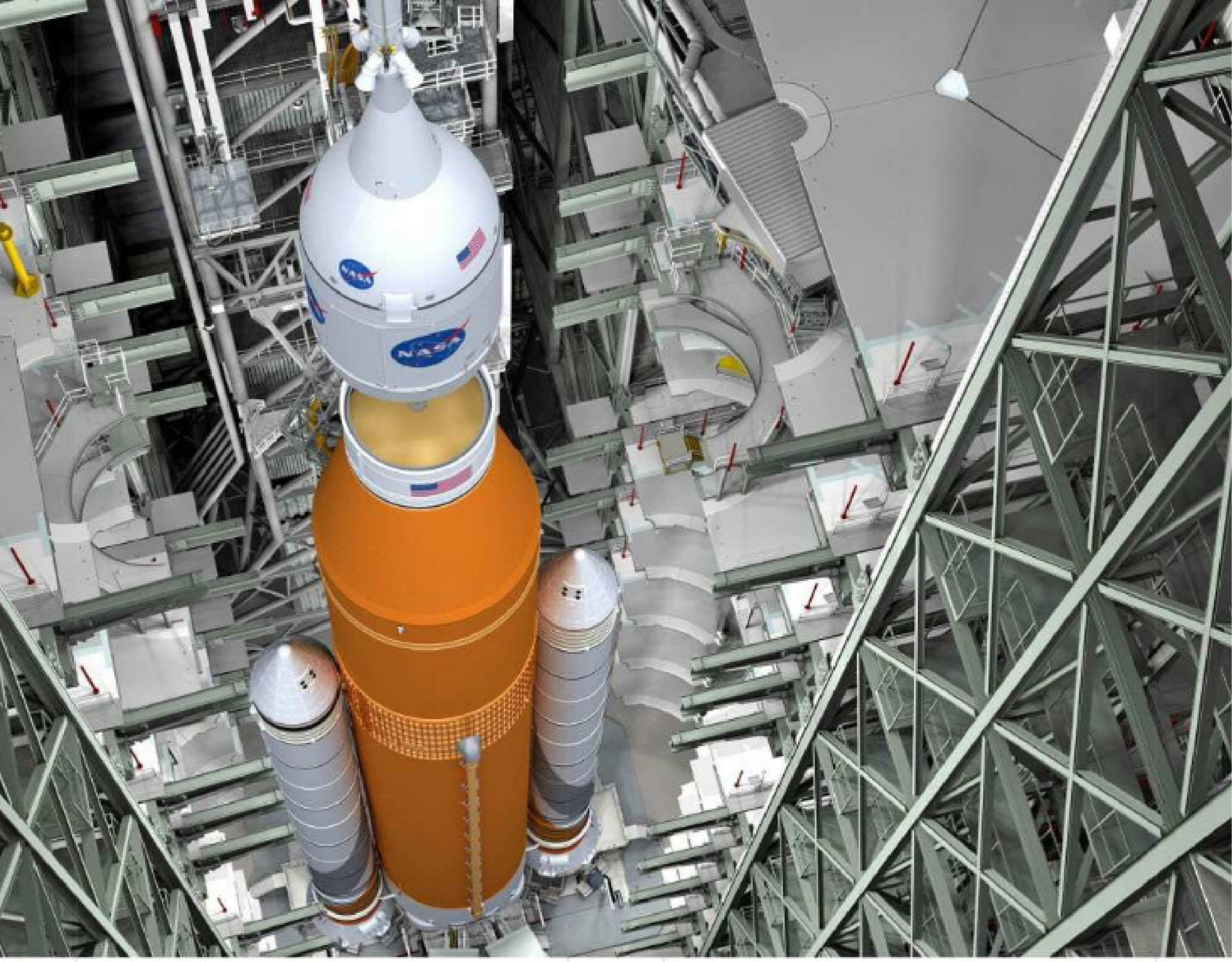
Imaginée dès les années 1900 par l'astrophysicien russe Constantin Tsiolkovski, un des pionniers de l'astronautique, la propulsion chimique a été de toutes les grandes étapes qui ont marqué l'histoire de la conquête spatiale. Depuis les missiles V2 allemands de Wernher von Braun, pendant la Seconde Guerre mondiale, au premier satellite *Spoutnik* mis en orbite par les Russes en 1957, en passant par le programme américain Apollo (dont le premier pas sur la Lune en 1969) et la mise sur orbite de la Station spatiale internationale, pour ne citer que les principales.
Comme tous les modes de propulsion spatiaux, la technologie chimique est fondée sur le principe de l'action-réaction théorisé par Tsiolkovski : la combustion d'ergols solides ou liquides (à base d'hydrogène, d'azote et d'oxygène) produit des gaz chauds. La détente de ces gaz dans une tuyère provoque leur accélération au moment de l'éjection, produisant, dans le sens opposé, la poussée nécessaire à la propulsion. Avec une puissance jusqu'ici inégalée : la propulsion chimique est la seule à offrir suffisamment de poussée (de 1 000 newtons (N) à plus de 10 millions de newtons, selon la taille du propulseur) pour arracher plusieurs tonnes de charge à la gravité terrestre.
En contrepartie, ce type de moteur souffre d'un handicap de taille : une forte consommation, qui nécessite d'embarquer de grandes quantités d'ergols à bord (85 % de la masse d'*Ariane 5 ECA* au décollage est constituée par l'ensemble carburant-comburant !). Et plus on embarque d'ergols, plus il faut d'ergols pour décoller… Un cercle vicieux qui limite la capacité de ce mode de propulsion à pouvoir projeter dans l'espace une forte charge, comme celle que nécessiterait une mission habitée. À moins d'imaginer des scénarios complexes, comme d'envoyer une fusée en kit en orbite terrestre à l'aide de lancements successifs, et d'assembler les sous-ensembles sans la contrainte de la gravité.

MARS EN 6 À 11 MOIS

Malgré ses limites, la propulsion chimique est le mode de propulsion le plus utilisé et donc le plus mature pour l'instant. C'est donc elle qui a été retenue par la Nasa pour son projet titanesque : fabriquer la fusée la plus puissante de tous les temps, dans l'objectif d'emmener des hommes sur Mars à l'horizon 2035. Soit un périple de 55 à 400 millions de kilomètres de la Terre, selon les positions des deux planètes sur leurs orbites respectives. Il s'agit du lanceur *Space Launch System* (*SLS*) qui, dans la version lourde (bloc II) nécessaire pour un tel voyage, pèse 3 000 tonnes et fait 111 mètres de haut !
Le premier vol du *Space Launch System* devrait avoir lieu en 2018. Il servira à mettre sur orbite le nouveau vaisseau spatial *Orion*. Malgré les apparences, le projet n'est pas le concentré d'innovations que l'on pourrait imaginer. Pour des raisons d'économies budgétaires, il prévoit en effet la réutilisation massive de technologies existantes (issues du programme Constellation de retour vers la Lune, abandonné en 2010, et de l'ex-navette spatiale américaine *STS*, mise à la retraite en 2011). Les 4 moteurs RS-25 du premier étage qui serviront au décollage sont des versions légèrement améliorées (nouveau contrôleur, isolation des injecteurs…) des moteurs de l'ancienne navette *STS*. Pas de rupture technologique en vue, donc : ils offriront une poussée de 1 860 kN chacun – contre 1 760 kN pour la navette – soit un gain de moins de 10 %.
Selon la Nasa, la fusée sera capable de rejoindre Mars en six à onze mois, en éteignant les moteurs pour bénéficier au maximum de l'assistance gravitationnelle (l'attraction de planètes placées sur l'itinéraire) comme poussée gratuite pendant le voyage.
Il faut se rendre à l'évidence, la propulsion chimique a quasiment atteint ses limites. *« On continuera d'utiliser la propulsion chimique pour envoyer des sondes vers Saturne, Uranus ou Neptune,* estime Jean-Pierre Lebreton, ex-responsable scientifique de la mission Huygens de l'ESA pour l'étude de Titan. *Elle connaîtra probablement quelques petites améliorations, mais on n'attend pas de révolution dans ce domaine. »* Sauf découverte majeure, et malgré d'excellents états de service (exception faite de quelques accidents marquants, comme la désintégration de la navette *Challenger* en plein vol, en 1986), la chimie ne pourra donc pas emmener l'humanité plus loin que Mars, si elle y parvient. Pour les odyssées plus lointaines, nous n'aurons pas d'autre option que de développer de nouvelles technologies.



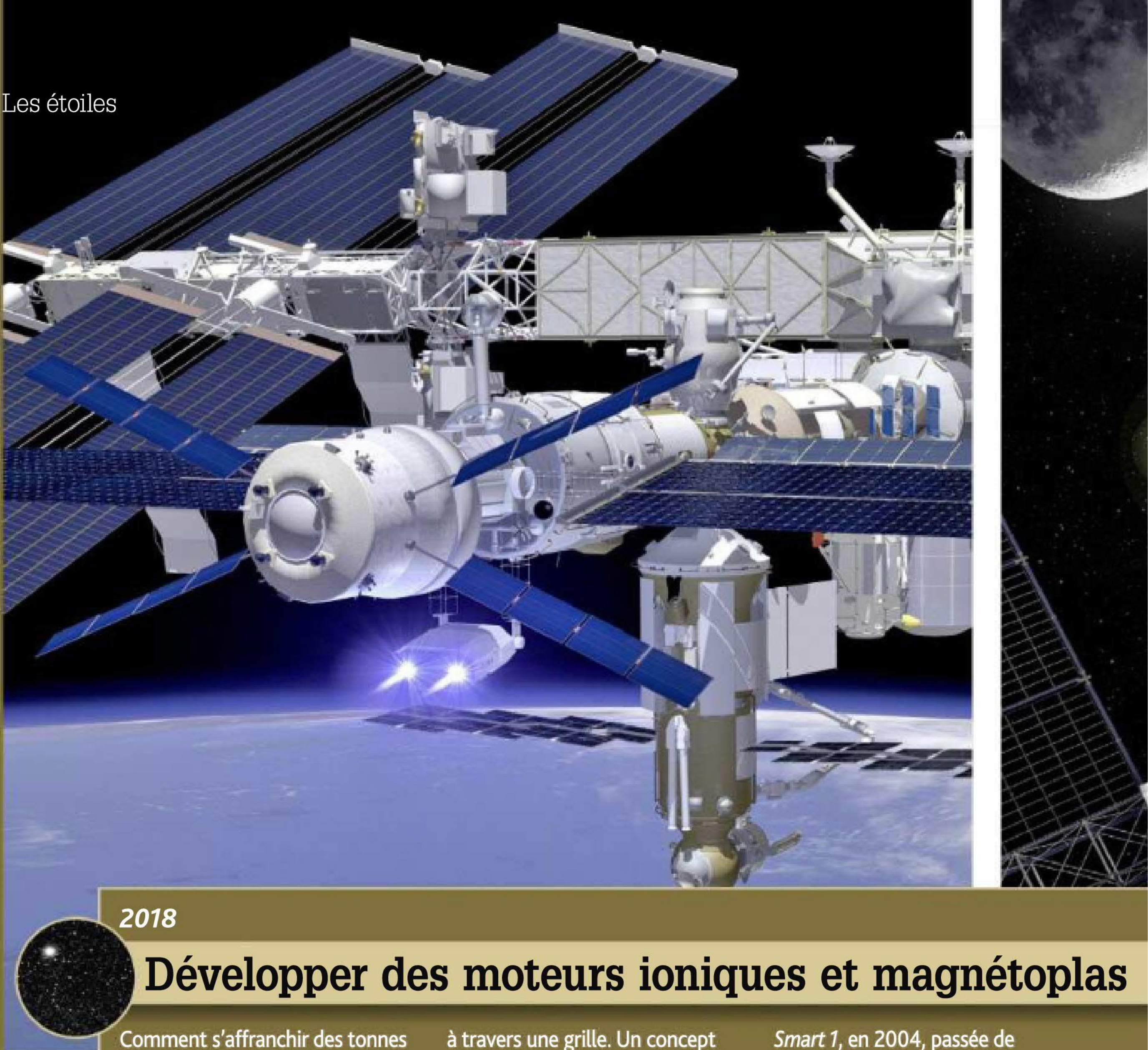






<^ Haut de 111 m et pesant 3 000 t, le *Space Launch System* sera équipé de 4 moteurs plus puissants que ceux des précédents lanceurs. Premier vol prévu en 2018.

NASA



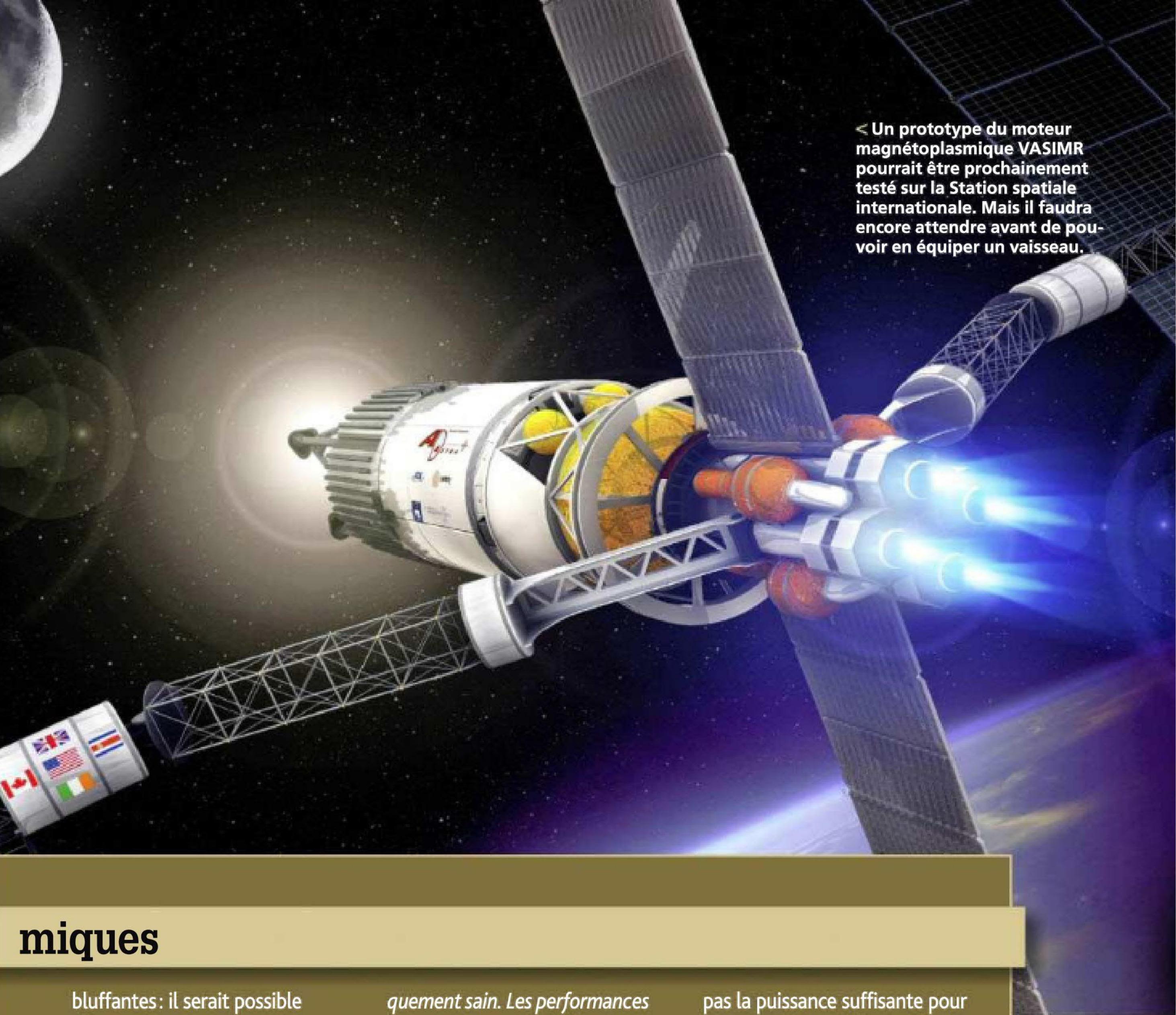
2018

Développer des moteurs ioniques et magnétoplas

Comment s'affranchir des tonnes d'ergols qui plombent la propulsion chimique ? Sachant que la poussée est proportionnelle à la masse éjectée et à la vitesse d'éjection, si on veut réduire la masse, pas d'autre solution que d'augmenter la vitesse. D'où l'idée de base de la propulsion ionique : accélérer des ions comme dans un accélérateur de particules. Le principe : chauffer un gaz (le plus souvent du xénon, neutre et peu corrosif) jusqu'à plusieurs centaines de milliers de degrés à l'aide d'un rayonnement électromagnétique. Il se transforme alors en plasma, un mélange d'ions et d'électrons. Deux méthodes sont ensuite utilisées pour accélérer les ions. La première consiste à former un champ électrique pour les accélérer et à les éjecter à travers une grille. Un concept testé avec succès en 1998 par la Nasa sur la sonde *DeepSpace 1* et utilisé depuis sur quelques satellites et sondes. L'autre méthode recourt à des aimants pour induire un champ électrique dans le plasma, lequel accélère les particules à des vitesses pouvant atteindre 100 km/s, là où la vitesse d'éjection des tuyères chimiques plafonne à 3 km/s. Le rendement de ces systèmes est très bon, car ils consomment très peu : la poussée par kilo de carburant est dix fois supérieure à celle de la propulsion chimique. Mais la poussée maximale reste très inférieure à celle d'un moteur chimique, en raison de la faible masse des particules éjectées. Elle est suffisante pour mouvoir une sonde déjà dans l'espace (comme *Smart 1*, en 2004, passée de l'orbite terrestre à l'orbite lunaire avec seulement 52 kg de xénon), mais pas pour des missions plus lourdes. Avec le vide requis pour l'ionisation des gaz, cela rend ces motorisations inadaptées pour un décollage depuis la Terre.

Mars en 39 jours !

Une autre technologie de moteur électrique ambitionne cependant de booster ces performances : la propulsion magnétoplasmique. Il s'agit cette fois d'utiliser la force de Lorentz pour accélérer les particules du gaz ionisé à l'aide d'un champ électromagnétique. Une variante de cette technologie imaginée par Franklin Chang-Diaz (physicien des plasmas et ancien astronaute américain) est annoncée avec des performances



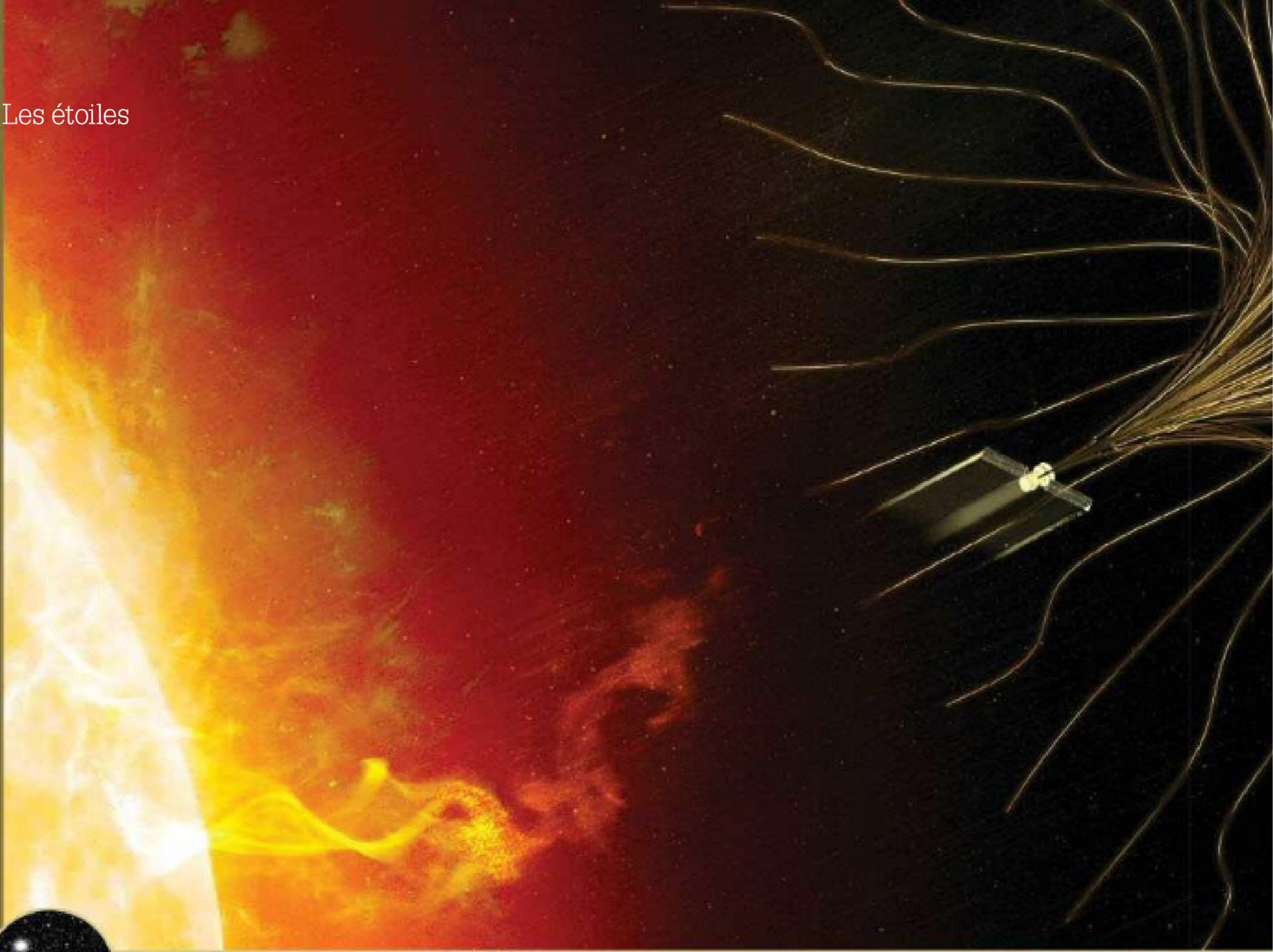
< Un prototype du moteur magnétoplasmique VASIMR pourrait être prochainement testé sur la Station spatiale internationale. Mais il faudra encore attendre avant de pouvoir en équiper un vaisseau.

miques

bluffantes : il serait possible d'atteindre Mars en 39 jours seulement contre les six à onze mois requis en propulsion chimique ! Baptisé VASIMR (pour Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket), ce mode de propulsion utilise des champs et des rayonnements électromagnétiques variables pour ioniser et accélérer un propergol vaporisé (hydrogène, argon ou hélium).

La technologie est prometteuse, mais elle n'a pas encore été testée dans l'espace. Son talon d'Achille : elle nécessite une importante puissance électrique. Bien supérieure à celle que fournissent habituellement les panneaux photovoltaïques embarqués sur les sondes et les satellites. *« Le concept du moteur VASIMR de Franklin Chang-Diaz est physiquement sain. Les performances annoncées sont probablement réalistes. Le seul problème, c'est qu'il faudrait embarquer une centrale nucléaire pour le faire fonctionner »,* résume Jean-Pierre Lebreton, chercheur au Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E). *« Contrairement à l'idée communément véhiculée, le moteur VASIMR ne nécessite pas de réacteur nucléaire pour fonctionner, et il est entièrement compatible avec la technologie de panneaux solaires à haut rendement en développement à la Nasa »,* répond Franklin Chang-Diaz. Mais seulement pour des missions orbitales terrestre ou lunaire. Dans le cas de missions habitées lointaines, vers Mars ou au-delà, l'énergie solaire n'offrira pas la puissance suffisante pour assurer un temps de transfert acceptable pour des équipages humains. Il faudrait alors, de l'aveu même de Chang-Diaz, recourir à l'énergie nucléaire, et prévoir des échangeurs thermiques pour refroidir l'ensemble et le maintenir à la bonne température. Des études de la Nasa ont toutefois démontré la faisabilité d'une telle centrale nucléaire miniature de poids raisonnable. Reste à tester le concept en conditions réelles. Ad Astra Rocket, l'entreprise fondée par Franklin Chang-Diaz, a passé un contrat avec la Nasa pour réaliser en 2018 un test de 100 heures en continu à haute puissance. Mais de longues études seront encore nécessaires avant d'envisager une mission lointaine mue par ce mode de propulsion.

AD ASTRA ROCKET CO.



D. FLORENTZ

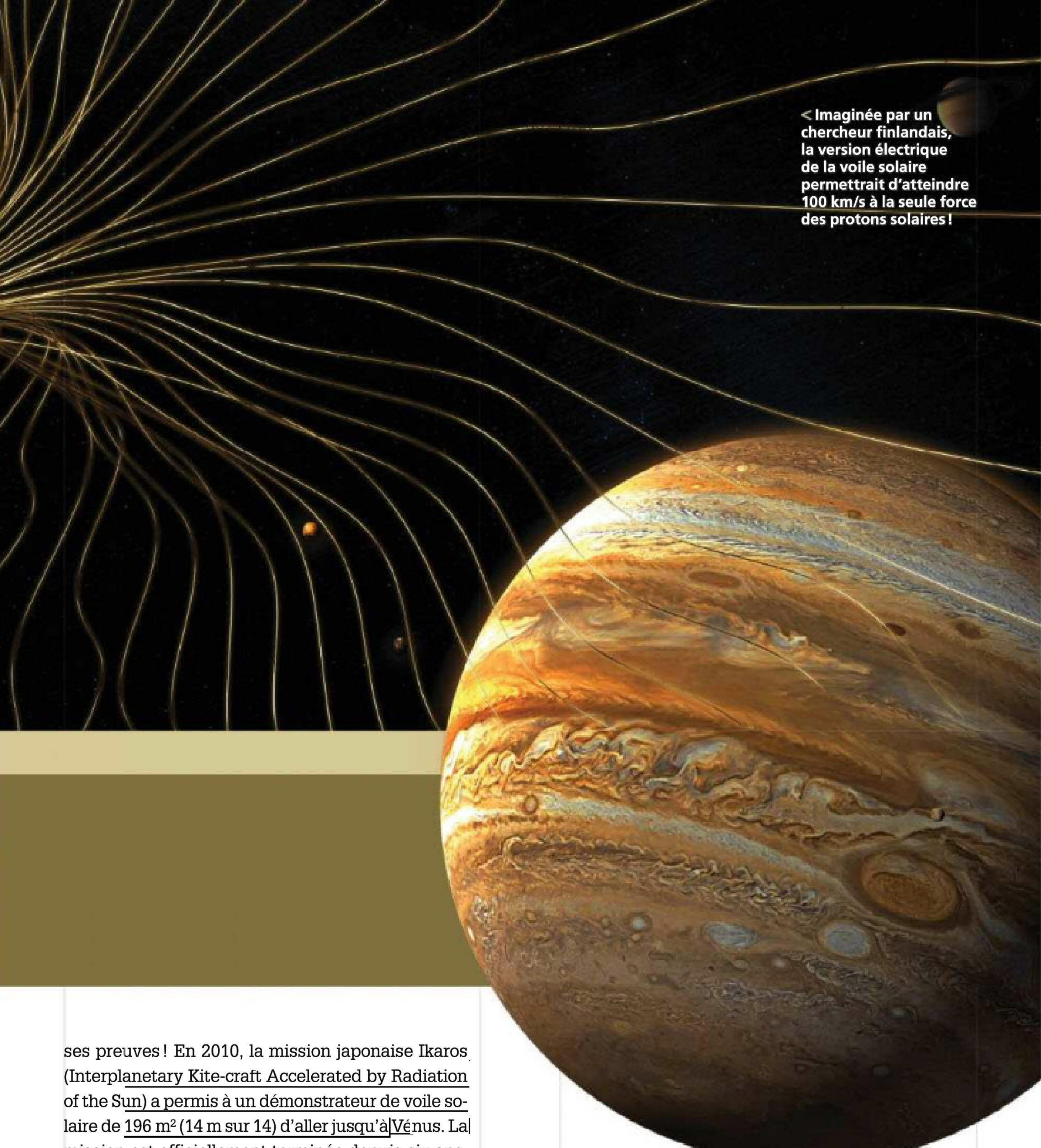
2016, 2017 ET 2020

Naviguer à la voile solaire

En 2010, un prototype de voile solaire a réussi à atteindre Vénus en n'utilisant que l'énergie du Soleil. Un mode de propulsion idéal pour des missions lointaines ? La technologie est prometteuse, mais elle n'est pas sans défauts…

Voyager loin dans l'espace, sortir du système solaire et découvrir de ses propres yeux les merveilles de la Voie lactée… Quel astronaute n'en a pas rêvé ? Pour qu'un tel périple soit réalisable, il faudrait pouvoir s'affranchir de tout carburant et trouver une source d'énergie directement disponible dans l'espace, comme le vent pour les voiliers. D'où l'émergence, dès les années 1920, d'une idée qui a largement inspiré les auteurs de science-fiction : utiliser le rayonnement solaire pour propulser une voile.

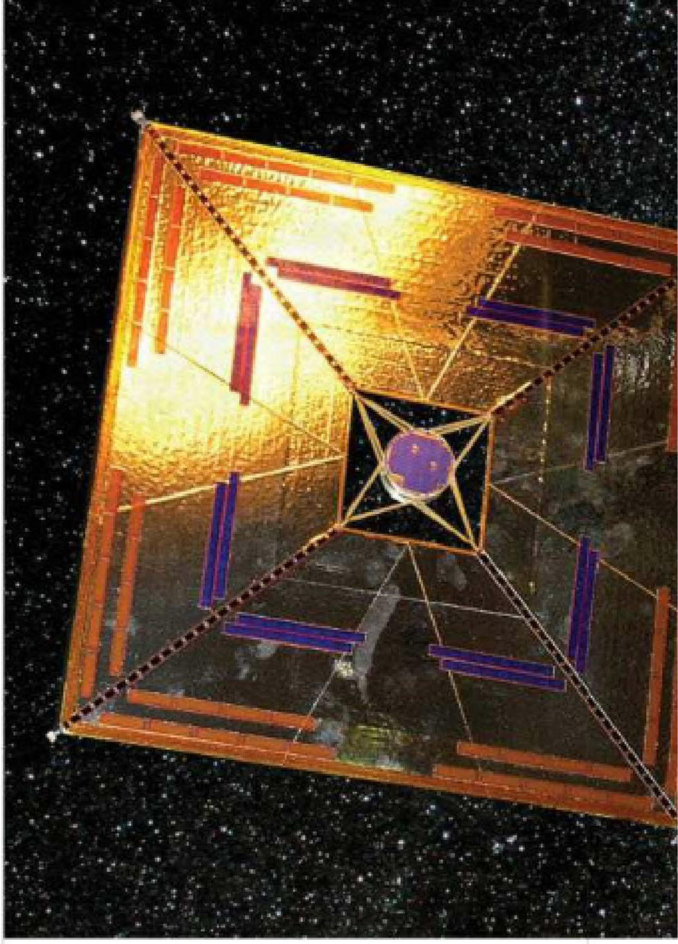
L'idée peut paraître farfelue. Elle est pourtant très sérieusement envisagée et étudiée comme un des modes de propulsion prometteurs pour l'avenir de la conquête spatiale. Mieux, elle a déjà fait



< Imaginée par un chercheur finlandais, la version électrique de la voile solaire permettrait d'atteindre 100 km/s à la seule force des protons solaires !

ses preuves ! En 2010, la mission japonaise Ikaros (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation of the Sun) a permis à un démonstrateur de voile solaire de 196 m² (14 m sur 14) d'aller jusqu'à Vénus. La mission est officiellement terminée depuis six ans, mais l'engin vole toujours. Il continue sagement d'orbiter autour du Soleil, et les ingénieurs japonais le réveillent régulièrement pour récolter ses mesures.

Le principe de base de la voile solaire ressemble effectivement à celui d'un voilier : il consiste à déployer une voile très fine imperméable au rayonnement solaire, c'est-à-dire fortement réfléchissante, comme un miroir. L'impact sur cette surface des photons émis par le Soleil agit alors comme le vent sur une voile, et provoque une poussée permettant de propulser l'engin. Cette dernière est extrêmement faible (1,12 millinewton pour *Ikaros*), mais avec un avantage de taille par rapport à un voilier constamment freiné par l'eau : dans l'espace, rien ne vient s'opposer à l'avancée du dispositif. Conséquence : « *L'accélération est lente, mais constante, ce qui permet d'atteindre de très grandes vitesses, de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde,* explique Jean-Pierre Lebreton, chercheur


JAXA

> Déployée dans l'espace en juin 2010, *Ikaros,* une voile solaire de 196 m², a survolé Vénus en décembre 2010. Depuis, elle vole toujours, orbitant autour du Soleil.

au Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E). *Ce mode est donc adapté pour aller vite et loin dans l'espace, en théorie jusqu'à l'héliopause, la frontière où le vent solaire s'atténue, contré par les vents stellaires. »*

Cette Formule 1 de l'espace est donc par nature dépendante du vent solaire, dont l'action s'affaiblit rapidement au fur et à mesure que la voile s'en éloigne (la diminution de la poussée est proportionnelle au carré de la distance parcourue). Une fois aux limites de l'action solaire, l'engin pourrait toutefois, en théorie, continuer sur sa lancée en conservant sa vitesse jusqu'à ce qu'une autre étoile prenne le relais et l'accélère à nouveau. Des scénarios encore plus futuristes imaginent même qu'un canon laser, installé sur Terre ou sur une autre planète et pointé sur la voile, pourrait lui envoyer les photons nécessaires. Comme le projet Breakthrough Starshot, lancé début 2016, qui prévoit de lancer ainsi des microsondes jusqu'à Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil…

Le concept est très séduisant sur le papier, mais malgré le succès d'*Ikaros,* il souffre encore de plusieurs handicaps. Le premier : la difficulté à déployer dans l'espace une voilure de taille importante pour augmenter la poussée. *« Pour que ce soit efficace, il faut des surfaces très grandes, mais légères, et donc très fines et fragiles »*, souligne Francis Rocard, responsable des projets d'exploration du système solaire au Cnes. De fait, l'épaisseur de la voile en polymère ultrarésistant (quelques micromètres) est dix fois plus mince que celle d'une feuille d'aluminium ! Ainsi, le projet Sunjammer, un temps envisagé par la Nasa, de mettre au point une voile solaire de 1 200 m² a finalement été abandonné en 2014.

UN RISQUE DE DÉCHIRURE ÉLEVÉ

D'autres projets restent cependant à l'étude. *« Les Japonais préparent une mission d'exploration des astéroïdes qui partagent l'orbite de Jupiter à l'aide d'une voile de 2 500 m² tapissée de cellules solaires,* expose Jean-Pierre Lebreton. *Elle fournirait une puissance électrique de 1 000 watts, ce qui permettrait, en plus de la propulsion photonique, d'alimenter un moteur ionique et donc d'utiliser également la propulsion électrique pour aller vers Jupiter. »* Et le Japon n'est pas le seul à miser sur cette technologie. Après un premier test d'ouverture d'une voile de 32 m² en orbite couronné de succès en mai 2015, l'association privée à but non-lucratif The Planetary Society envisage la mise sur orbite d'un deuxième démonstrateur, *LightSail 2*, en mars 2017, qui ira inspecter l'état du premier à la seule force des photons.

Mais tous ces programmes présentent le même écueil : la vulnérabilité de la voile face aux nombreux projectiles qu'elle a de fortes chances de croiser dans l'espace. *« Sur les distances et les vitesses en jeu, une simple poussière peut percer voire déchirer la voilure »*, reprend le chercheur français. Ce dernier collabore justement à un projet finlandais qui vise à améliorer le principe de la voile solaire traditionnelle pour en gommer les principaux défauts : la voile électrique solaire ou *e-sail.* Imaginée il y a une dizaine d'années par Pekka Janhunen, chercheur à l'institut finlandais de météorologie, elle présente quelques évolutions notables. Pour commencer, ce ne sont pas les photons qui sont utilisés, mais les protons solaires. L'avantage est que les seconds disposent d'une masse bien supérieure à celle des photons (considérée comme nulle), et offrent ainsi une puissance de propulsion 50 fois supérieure ! Autre atout, la voile est plus robuste. En fait, ce n'en est plus vraiment une, bien qu'elle se comporte physiquement de la même façon. Il s'agit de longs fils conducteurs (en aluminium ou en nanotubes de carbone) de plusieurs dizaines de kilomètres de long, attachés à la sonde à une de leurs extrémités. Celle-ci ressemblerait ainsi à une pieuvre précédée de



explique Jean-Pierre Lebreton. *On peut donc l'envisager pour larguer dans l'atmosphère d'une planète une sonde qui ralentira grâce aux frottements, mais pas pour mettre une sonde sur orbite, car la vitesse serait trop élevée. Il faudrait prévoir un moteur chimique en complément, pour freiner. »*

NEPTUNE EN SEULEMENT QUATRE ANS

Un système de démonstration de la voile solaire électrique de Pekka Janhunen devrait être mis en orbite autour de la Terre d'ici un an, dans un nanosatellite CubeSat estonien, puis envoyé au-delà de la magnétosphère (frontière au-delà de laquelle se situe le vent solaire, que le champ magnétique terrestre dévie) d'ici 2020, pour tester l'efficacité de la technologie en situation réelle. Si l'essai s'avère fructueux, des sondes automatiques pourraient bien être envoyées aux confins de l'espace pour en explorer les profondeurs, comme jamais cela n'a pu être fait auparavant. *« Avec la voile solaire électrique, on peut espérer atteindre Jupiter en un an, Saturne en deux ans, Uranus en trois ans, et Neptune en quatre ans »*, égrène Jean-Pierre Lebreton. À titre de comparaison, la sonde *Cassini* (à ergols liquides) a mis sept ans pour atteindre Saturne. Quant à *Voyager 2*, le seul engin ayant survolé Neptune à ce jour, il avait mis douze ans pour rejoindre la planète la plus éloignée du Soleil.

Peut-on, alors, espérer envoyer un jour un équipage à bord d'un voilier solaire d'exploration ? Peut-être, mais avec une contrainte non-négligeable : le voyage à l'aide d'une voile solaire est fatalement sans retour ! *« Le problème de cette technologie, c'est qu'elle permet de s'éloigner du Soleil, mais difficilement de s'en rapprocher »*, signale Francis Rocard. Seule solution : tirer des bords, en se déplaçant de biais par rapport au rayonnement et en changeant régulièrement de trajectoire, comme lorsque les marins avancent face au vent. Difficile, mais possible, comme l'ont démontré les Japonais en envoyant leur sonde vers Vénus, plus proche du Soleil que la Terre. Mais elle ne pesait que 315 kg. Pour des voiliers au long cours embarquant un équipage, il faut se faire une raison : ils restent pour l'instant du domaine de la science-fiction. Ceci dit, tout espoir n'est peut-être pas perdu : l'envoi d'un homme sur la Lune semblait, lui aussi, tenir de la science-fiction pour les observateurs du XIX[e] siècle… ●

tentacules interminables, formant un cône allant en s'évasant, comme une vaste toile d'araignée chargée de capturer les protons solaires. Comment tout cela avance-t-il? Ces longs câbles seraient mis sous tension (à environ 10 000 volts) et polarisés, pour qu'ils soient chargés positivement, comme les protons solaires. La suite est identique à ce qui arrive quand on approche deux aimants de même polarité : ils se repoussent. *« La gaine électrostatique qui se forme autour de chaque câble est comme un miroir pour les protons solaires,* détaille Jean-Pierre Lebreton. *En théorie, la poussée obtenue est de 10 à 100 fois supérieure à celle d'une voile solaire classique à photons, ce qui permettrait d'atteindre une vitesse supérieure à 100 km/s ! »*

Par nature, cette voile discontinue est moins sensible au risque de collision avec des poussières ou des cailloux stellaires. Et même si cela arrivait, les câbles sont composés de 4 brins, de façon à ce qu'ils restent opérationnels même en cas de rupture de l'un des brins. Une inconnue demeure toutefois : la capacité à manœuvrer et à faire changer de direction un tel dispositif en accélération permanente. *« Le principal handicap d'une voile solaire électrique, c'est qu'une fois lancée, elle ne peut pas freiner,*

Des sondes automatiques pourraient être envoyées aux confins de l'espace, comme jamais cela n'a pu être fait auparavant

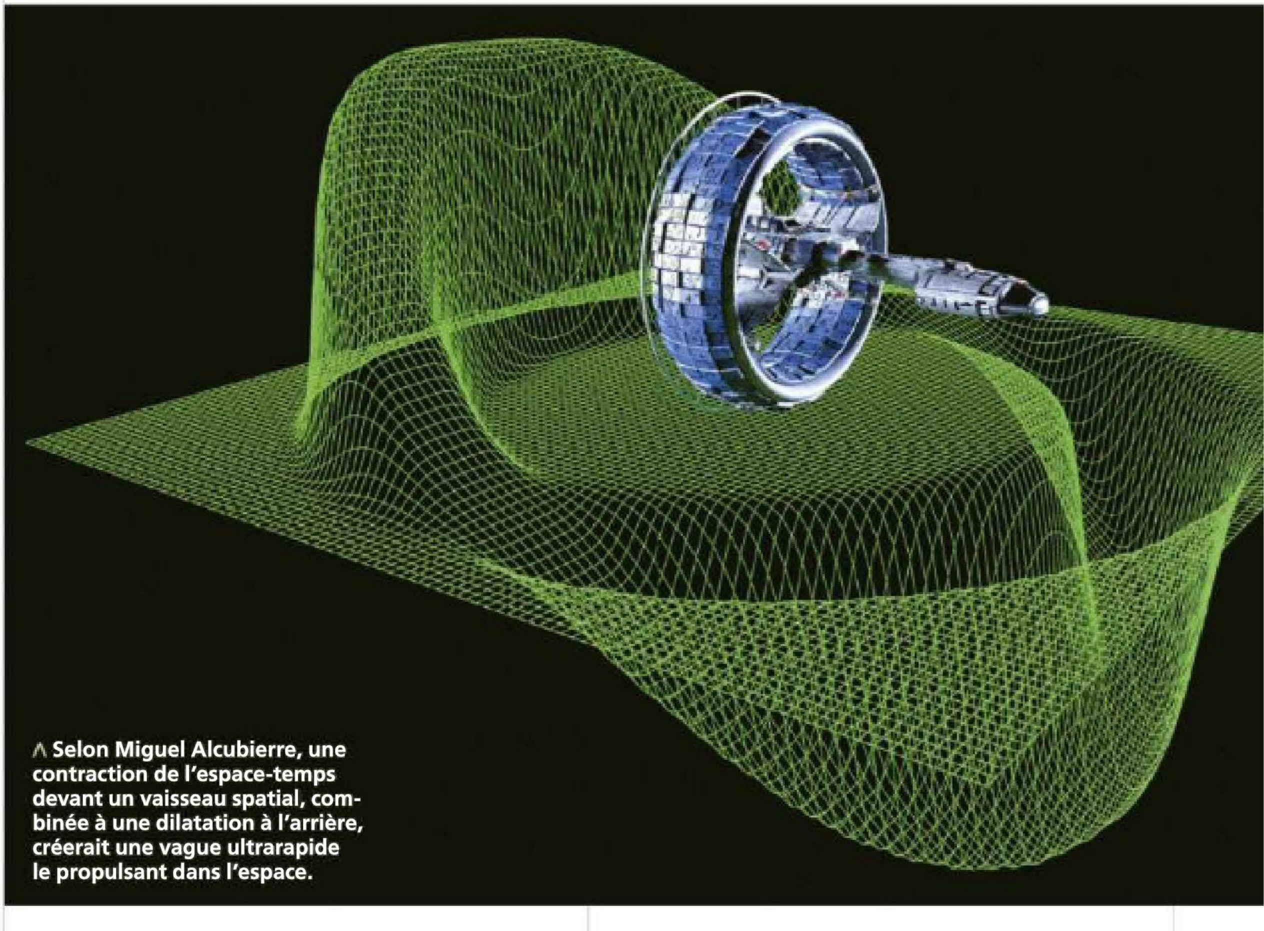
PAS DE DATE DÉFINIE

Le plan antimatière

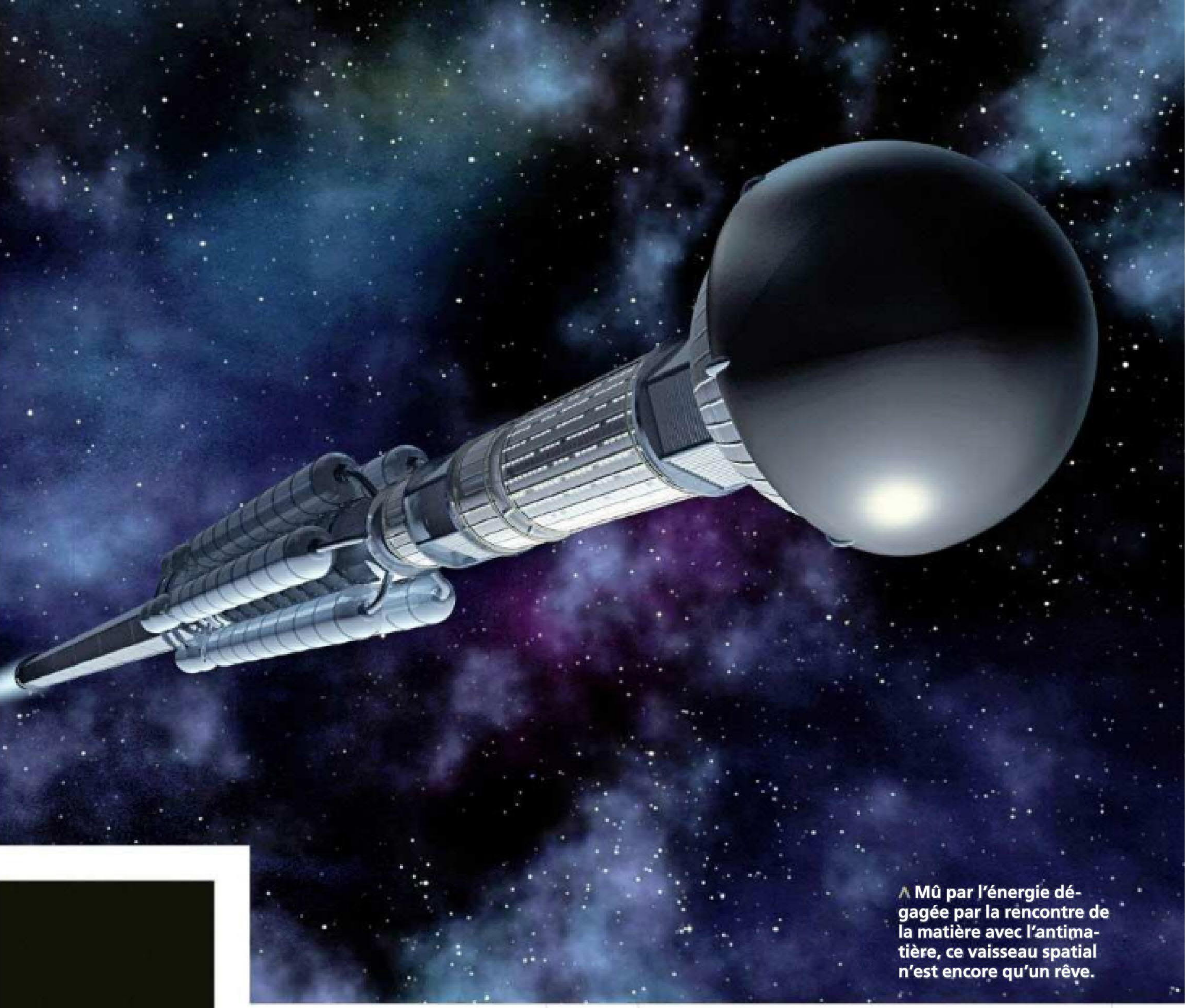
Dans un futur bien plus lointain, un autre mode de propulsion pourrait voir le jour : le moteur à antimatière. L'antimatière ? C'est la face cachée de la matière, son double négatif en quelque sorte. Chaque antiparticule est comme le reflet dans le miroir de chacune de nos particules familières. Elles sont identiques, de même masse, mais de charges strictement opposées. Or, quand l'antimatière rencontre la matière, toutes deux s'annihilent dans une spectaculaire débauche d'énergie sous forme de rayonnement de photons, dont la vitesse d'éjection théorique est celle de la lumière ! Pourquoi ne pas utiliser cette énergie à des fins de propulsion ? Car c'est là un processus des plus efficaces pour convertir la masse en énergie, bien au-delà du rendement des centrales nucléaires, ce qui permettrait de réduire drastiquement la quantité de carburant à embarquer.

UN COÛT EXORBITANT

« La formule d'Einstein $E = mc^2$ montre que l'annihilation de 1 g d'antimatière fournit autant d'énergie que la fission de 5 kg de plutonium, soit l'équivalent de la bombe d'Hiroshima d'une puissance de 20 kilotonnes », rappelle l'astrophysicien français Nicolas Prantzos, dans *Voyages dans le futur*. Seul hic : si la matière est omniprésente, l'antimatière, elle, ne se trouve pas naturellement : il faut la fabriquer… au prix d'une dépense d'énergie colossale ! *« La production de quelques milligrammes d'antimatière dans les accélérateurs de particules coûterait plusieurs centaines de millions d'euros »*, confirme Elisa Cliquet-Moreno, du Cnes. Quand on sait qu'il en faudrait environ 10 milligrammes pour aller sur Mars, on imagine le coût astronomique d'un voyage interstellaire qui en consommerait 100 à 1000 fois plus ! En 2006, la Nasa avait annoncé un projet visant l'utilisation de positrons (l'antimatière des électrons) pour diviser par 400 la dépense énergétique par rapport à la production traditionnelle d'antiprotons. Mais la baisse du coût prévue n'a pas eu lieu et le projet n'a toujours pas dépassé le stade du papier…



∧ Selon Miguel Alcubierre, une contraction de l'espace-temps devant un vaisseau spatial, combinée à une dilatation à l'arrière, créerait une vague ultrarapide le propulsant dans l'espace.



∧ Mû par l'énergie dégagée par la rencontre de la matière avec l'antimatière, ce vaisseau spatial n'est encore qu'un rêve.



PAS DE DATE DÉFINIE

Le passage par l'espace-temps

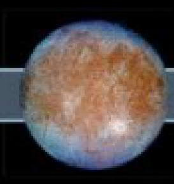
Dans son laboratoire de recherche avancée Eagleworks, la Nasa creuse des pistes de plus en plus audacieuses, comme l'exploitation du vide quantique ou la déformation de l'espace-temps. Déjà mise en scène dans des films de science-fiction comme *Star Trek* ou *Avatar*, cette technique consiste à exploiter les propriétés de la théorie de la relativité générale, qui stipule que l'espace et le temps sont étroitement liés et se déforment sous l'effet des masses qui peuplent l'Univers. L'idée consiste alors à utiliser une distorsion de cet espace-temps pour obtenir une vitesse de déplacement supérieure (jusqu'à 10 fois) à celle de la lumière (300 000 km/s), chose en théorie impossible. Comment ? Selon le découvreur de cette théorie, le physicien mexicain Miguel Alcubierre, une contraction de l'espace-temps devant le vaisseau spatial, compensée par une dilatation à l'arrière, créerait une sorte de vague ultrarapide. C'est sur cette vague que surferait le vaisseau. Ce qui mettrait, par exemple, l'étoile Alpha du Centaure, située à plus de 4 années-lumière, à seulement deux semaines de voyage de la Terre ! Reste toutefois à trouver un moyen de créer cette vague. Selon Miguel Alcubierre, seule une énorme quantité de matière de masse négative serait susceptible de créer cette distorsion. Problème, cette matière n'a jamais pu être observée et son existence même fait toujours l'objet de débats au sein de la communauté scientifique…

SPL/COSMOS - G. CIRADE

PERCER LES MYSTÈRES D'EUROPE



PAR SERGE BRUNIER



LES SONDES *JUNO* (NASA) ET *JUICE* (ESA)

2016 ET 2030

Si la sonde américaine se focalise sur Jupiter, la sonde européenne survolera par deux fois Europe à seulement 400 km d'altitude.

EUROPA MISSION (NASA)

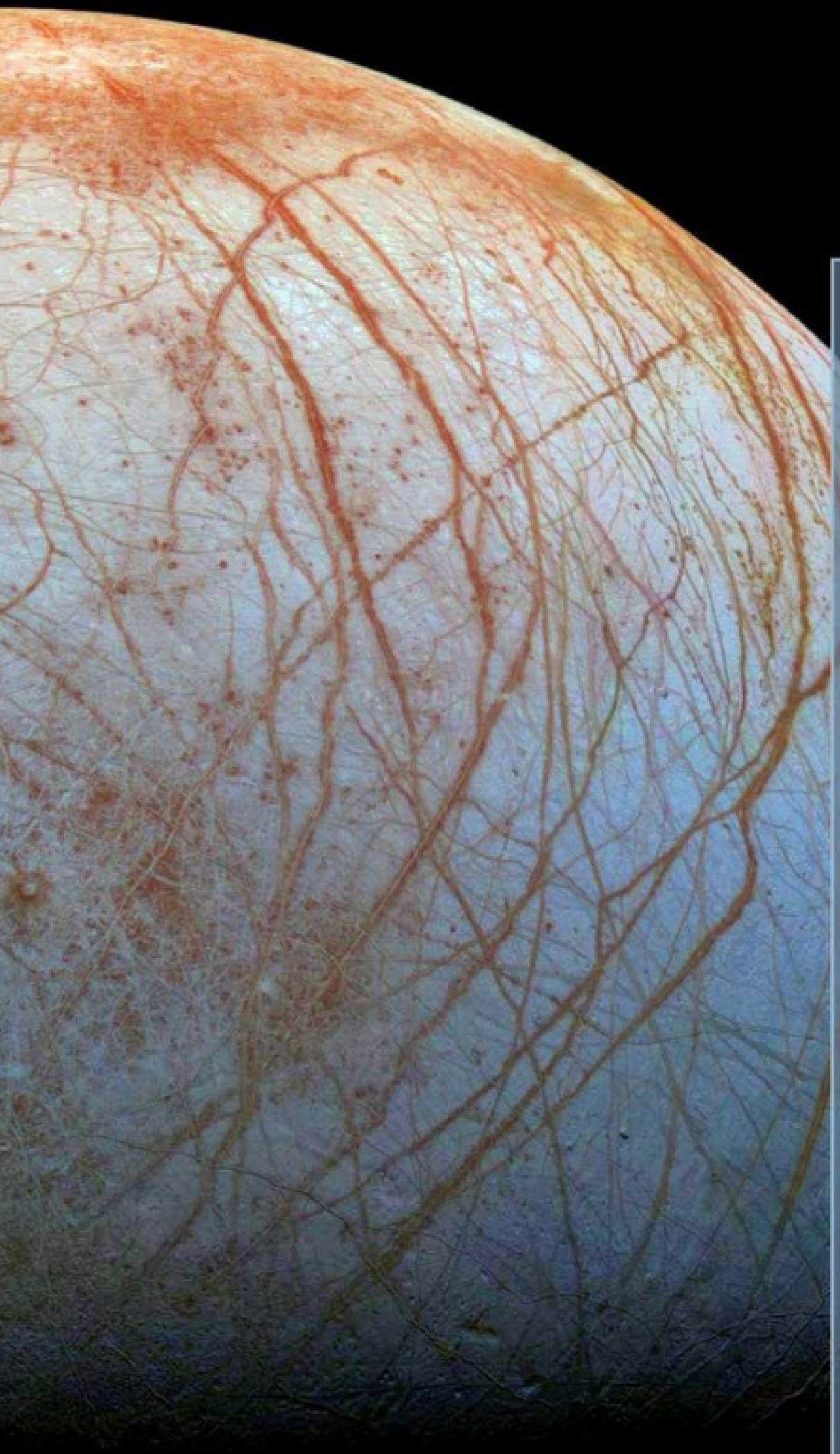
2026 OU 2029

Cette grande mission spatiale projette de mettre une sonde en orbite autour d'Europe et peut-être même d'y déposer un module.

PROJET DE MISSION SOUS-MARINE (NASA)

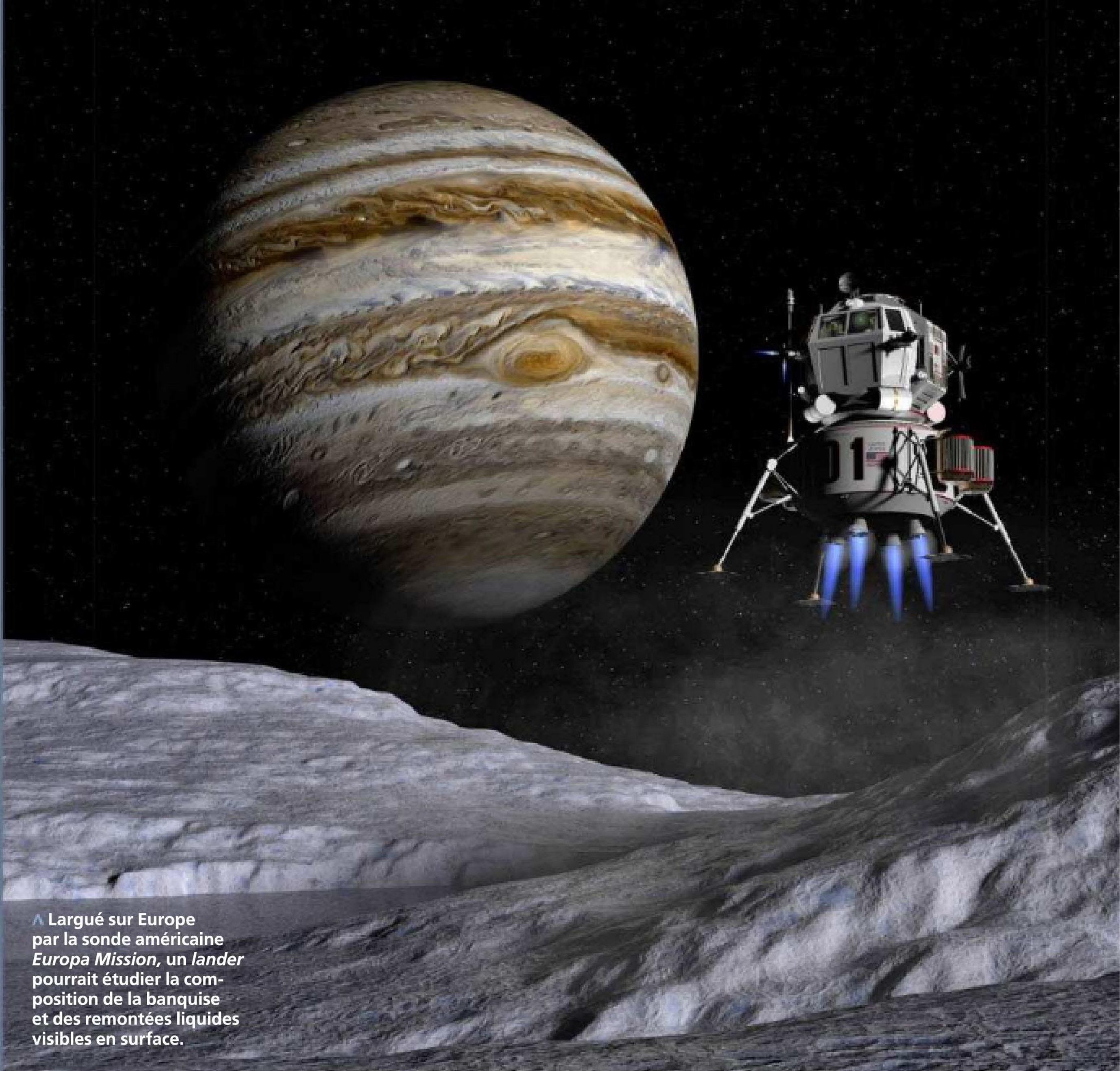
D'ICI 2040

Dans le cadre de son programme Niac, la Nasa envisage d'envoyer des robots explorer l'océan d'Europe au cours du quart de siècle qui vient.



Comme les trois autres grands satellites de Jupiter (Io, Ganymède et Callisto), Europe a été découvert par Galilée en 1610 avec la toute première lunette astronomique. Avec ses 3122 km de diamètre, Europe est un peu plus petit que la Lune, et il tourne en 3,5 jours autour de la plus grande planète du système solaire. Ce sont les sondes Voyager 1 *et* Voyager 2, *en 1979, et surtout la sonde* Galileo, *en orbite autour de Jupiter entre 1995 et 2003, qui nous ont permis de découvrir ce monde lointain et mystérieux. Intégralement recouvert de glace, Europe est une sphère presque parfaitement lisse. Son relief se limite à des fractures de quelques dizaines de mètres de profondeur dessinant de vastes zones de rayures, et à quelques séracs et blocs de glace. À peu près vierge de cratères d'impact, la surface d'Europe est remarquablement jeune. Enfin, et surtout, cette banquise cache sans doute un profond océan. Et c'est lui qui, aujourd'hui, fascine et attire les planétologues…*

SETI INSTITUTE/JPL-CALTECH/NASA



^ Largué sur Europe par la sonde américaine *Europa Mission*, un *lander* pourrait étudier la composition de la banquise et des remontées liquides visibles en surface.

2016 ET 2030



Le survoler de nouveau

Délaissé deux décennies durant au profit de Mercure, Vénus, Mars, Saturne et Pluton, le monde de Jupiter est de nouveau en ligne de mire des deux grandes agences spatiales, la Nasa et l'Esa. C'est d'abord la sonde américaine *Juno*, lancée en août 2011, qui a abordé le 4 juillet dernier le système de Jupiter et s'est satellisée autour de la planète géante. Installée sur une orbite polaire, elle étudiera un an durant l'atmosphère de Jupiter, son champ magnétique intense (véritable danger pour les sondes qui se dirigeront vers Europe !) et son champ gravitationnel qui crée des effets de marée suffisants pour chauffer le cœur de Io, Europe et Ganymède, et les liquéfier partiellement. Puis, en 2022, c'est la sonde européenne *Juice (Jupiter Icy Moon Explorer)* qui partira explorer les grands satellites glacés de Jupiter, Europe et Callisto, avant de se satelliser autour de Ganymède. Lors de ses deux survols d'Europe, à seulement 400 km d'altitude, les planétologues pourront étudier la surface glacée du satellite et analyser sa composition. À l'aide de la caméra Janus, ils photographieront la moitié de la surface d'Europe avec une résolution de 2 kilomètres, et quelques spots, survolés de plus près, seront perçus avec une résolution de quelques dizaines de mètres seulement.



2026 OU 2029

Se poser enfin dessus !

Se poser sur Europe… Un rêve d'astronome, tant la lune glacée de Jupiter fait rêver, par les paysages de science-fiction qu'elle promet, avec l'immense globe jaune, brun, grège, rose de la planète géante dans son ciel, et par ce qu'elle voile aussi, sous son manteau de glace blanche et bleue. Car, à la fin du xxe siècle, la sonde *Galileo,* en orbite autour de Jupiter, a révélé qu'Europe, perpétuellement malaxé par les intenses marées gravitationnelles levées par Jupiter et ses trois autres satellites, était probablement en partie liquide ! Sa surface éclatante, presque parfaitement sphérique, est aussi étonnamment jeune. Le taux de cratérisation, utilisé comme chronomètre géologique pour évaluer l'âge des astres du système solaire, indique que la surface d'Europe est entièrement renouvelée tous les 100 millions d'années, un chiffre à comparer avec certaines régions de Mars, de Mercure, de Ganymède ou de Callisto, vieilles de plus de 4 milliards d'années !
Europe est donc un astre jeune, très actif géologiquement. Mais son activité est essentiellement glaciaire, car la surface du satellite est une véritable banquise, qui flotte sur un profond océan d'eau liquide. Par endroits, *Galileo* a photographié des morceaux de cette banquise qui ont bougé, basculé, tourné sur eux-mêmes. Connaître la composition de cette glace et découvrir celle des matériaux sombres qui proviennent manifestement des profondeurs d'Europe, tels seront quelques objectifs de la grande mission spatiale que la Nasa vient enfin de décider : Europa Mission. Soutenue par les scientifiques, qui rêvent de savoir ce qui se passe sous la glace d'Europe, cette mission est également plébiscitée par le Congrès américain. Ce dernier a voté une rallonge budgétaire pour exhorter la Nasa à lancer au plus vite cette mission qui, après l'aventure des sondes martiennes, passionnera les foules. La sonde *Europa Mission* pourrait quitter la Terre en 2024 et arriver sur place en 2029, si elle est lancée par une fusée classique, ou dès 2026, si le futur lanceur *SLS* (*Space Launch System*) est utilisé, comme le Congrès le demande.

UN RÊVE DE PLANÉTOLOGUE

La sonde ressemblera beaucoup à sa cousine européenne *Juice*, à ceci près qu'elle se focalisera sur Europe. Elle embarquera des caméras pour scanner sa surface avec une résolution de 50 m (jusqu'à 50 cm par endroits !), un radar pour sonder la glace et mesurer à quelle profondeur se trouve l'eau liquide, une caméra thermique pour chercher, s'il y en a, des spots d'où jaillirait l'eau en surface, et des spectromètres pour analyser la composition des matériaux que l'on voit sur cette banquise.
Mais, boostée par un Congrès sensible aux attentes du grand public, la Nasa a surpris le petit monde spatial en annonçant que la sonde pourrait aussi embarquer un module d'atterrissage ! Si cela se confirme, c'est à une mission exceptionnelle que l'on aura la chance d'assister, car poser un module sur Europe est un rêve de planétologue. Bien sûr, cet exploit ne constituerait pas une première : plusieurs sondes se sont posées avec succès sur la Lune, Vénus, Mars, Titan… *Philaé* s'est posé sur une comète, *Hayabusa* a effleuré du bout de ses antennes l'astéroïde Itokawa et *Near* s'est endormie dans les bras d'Eros…
Le défi est ailleurs. D'abord, Jupiter génère un champ magnétique quasi létal pour les électroniques les plus résistantes. Ensuite, les régions les plus intéressantes visées par la Nasa pour son module (là où de l'eau émergerait en surface) sont plus chaotiques : vallées étroites et profondes, hautes falaises… La Nasa envisage donc de doter son module de rétrofusées identiques à celles du rover martien Curiosity, d'une caméra et d'un système d'intelligence artificielle capable de décider au dernier moment où se poser. C'est en ce sens que la mission serait inédite. Généralement, les ingénieurs et les scientifiques savent où poser leurs engins, ou alors ils les laissent, comme dans le cas de *Huygens* sur Titan ou de *Venera* sur Vénus, aux bons soins de la Providence. Ce qui ne marche pas toujours, comme en témoigne le demi-succès de *Philaé* sur la comète Churyumov-Gerasimenko.
Pour cette mission, les Américains envisagent de laisser le module Europa Lander sur une orbite d'attente, loin du dangereux champ magnétique jovien, pendant que la sonde scannerait la surface de la banquise d'Europe à la recherche du meilleur site d'atterrissage, où le module se poserait deux ou trois ans plus tard. À ce jour, il est impossible de dire si *Europa Mission* emportera ou pas un *lander,* ni si c'est bien le *SLS,* en cours de construction, qui l'emmènera là-bas et quand… Le feuilleton d'*Europa Mission* ne fait que commencer, mais il nous fait déjà rêver !

D. ROBINSON, 2007



D'ICI 2040

Y rechercher la vie avec des robots

Sous les kilomètres de glace qui recouvrent Europe, un mystérieux océan fait rêver les scientifiques, pour les traces de vie qu'il pourrait renfermer. D'où le projet de la Nasa d'envoyer des robots sonder ses profondeurs.

Lentement mais sûrement, Europe remplace Mars dans l'imaginaire de ceux qui rêvent le nez en l'air, en contemplant le ciel… Pour la Nasa, Europe est désormais la nouvelle cible, à la fois technologique, scientifique et médiatique. Et ce n'est pas un hasard : le mantra de l'agence spatiale américaine, chercher la vie ailleurs dans l'Univers, a besoin d'un nouveau souffle. La planète rouge est scrutée depuis l'orbite et arpentée en surface par les sondes spatiales depuis quarante ans, sans que le moindre microbe n'ait jamais été déniché. On continue à gratter plus profondément la poussière martienne en quête de trace de vie, mais l'enthousiasme des débuts n'y est plus, et la formidable agence de communication qu'est aussi la Nasa l'a bien compris. Alors vers quelle destination diriger ses fusées ? Vers Europe, principalement. Car cette petite planète de glace qui tourne autour de Jupiter cache sans doute un océan immense. Océan qui, imaginent les chercheurs, pourrait héberger des formes de vie…

Mais cet océan existe-t-il vraiment ? Et comment y accéder pour y chercher une hypothétique vie ? Après les observations de la surface d'Europe et de son champ de gravitation par la sonde *Galileo*, les planétologues ont dressé deux portraits-robots possibles du monde de glace, à peine plus petit que la Lune. Au cœur de cet astre léger, un noyau métallique très dense, surmonté d'un épais manteau de roches plus légères, puis d'une couche d'eau d'environ 100 kilomètres d'épaisseur. Un volume vertigineux : 3 milliards de kilomètres cubes, plus de deux fois le volume d'eau qui recouvre la Terre entière ! Mais cette eau, sous quelle forme existe-t-elle ? Solide ou liquide ? La plupart des spécialistes pensent que les intenses marées gravitationnelles de Jupiter, Io, Ganymède et Callisto sont suffisantes pour chauffer et liquéfier ce volume d'eau, sauf en surface, où la température est de –200 °C.

Europe fascine car son océan à l'abyssale profondeur pourrait abriter des formes de vie d'une inimaginable diversité

UN OCÉAN D'EAU… SALÉE ?

Dans certains modèles, cependant, l'ensemble de cette eau existe sous forme de glace, une glace chaude très plastique, proche de 0 °C. C'est tout l'enjeu des missions Juice et Europa Mission de démontrer que, sous la banquise d'Europe, existe bel et bien un océan… Pour le planétologue François Forget, directeur de recherche au CNRS, *« il y a désormais un fort consensus dans la communauté planétologique pour penser qu'il existe effectivement un océan sous la glace d'Europe. »* Mieux : d'après les données de *Galileo*, qui a mesuré son champ magnétique, le sous-sol d'Europe est conducteur d'électricité, comme pourrait l'être un océan d'eau salée !

Cette possible présence d'eau salée, identique à l'eau des mers terrestres où la vie est apparue voici près de 4 milliards d'années, fait désormais rêver

ILLUSTRER.FR

Atteindre l'océan caché d'Europe

Selon le scénario imaginé par Nasa, le forage sur des kilomètres, voire des dizaines de kilomètres de la banquise d'Europe sera confié à un cryorobot. Puis ce sont trois petits robots sous-marins, libérés dans l'eau une fois le forage achevé, qui exploreront l'océan d'Europe et y rechercheront d'éventuelles formes de vie.



1 Forage de la glace au laser

Libéré par le module d'atterrissage, le cryorobot liquéfiera la glace à l'aide d'un laser. L'énergie nécessaire au robot et à son laser (plusieurs centaines de kilowatts) sera délivrée par une fibre optique que le robot déroulera derrière lui. Elle servira aussi à remonter vers la surface les informations collectées par le robot.



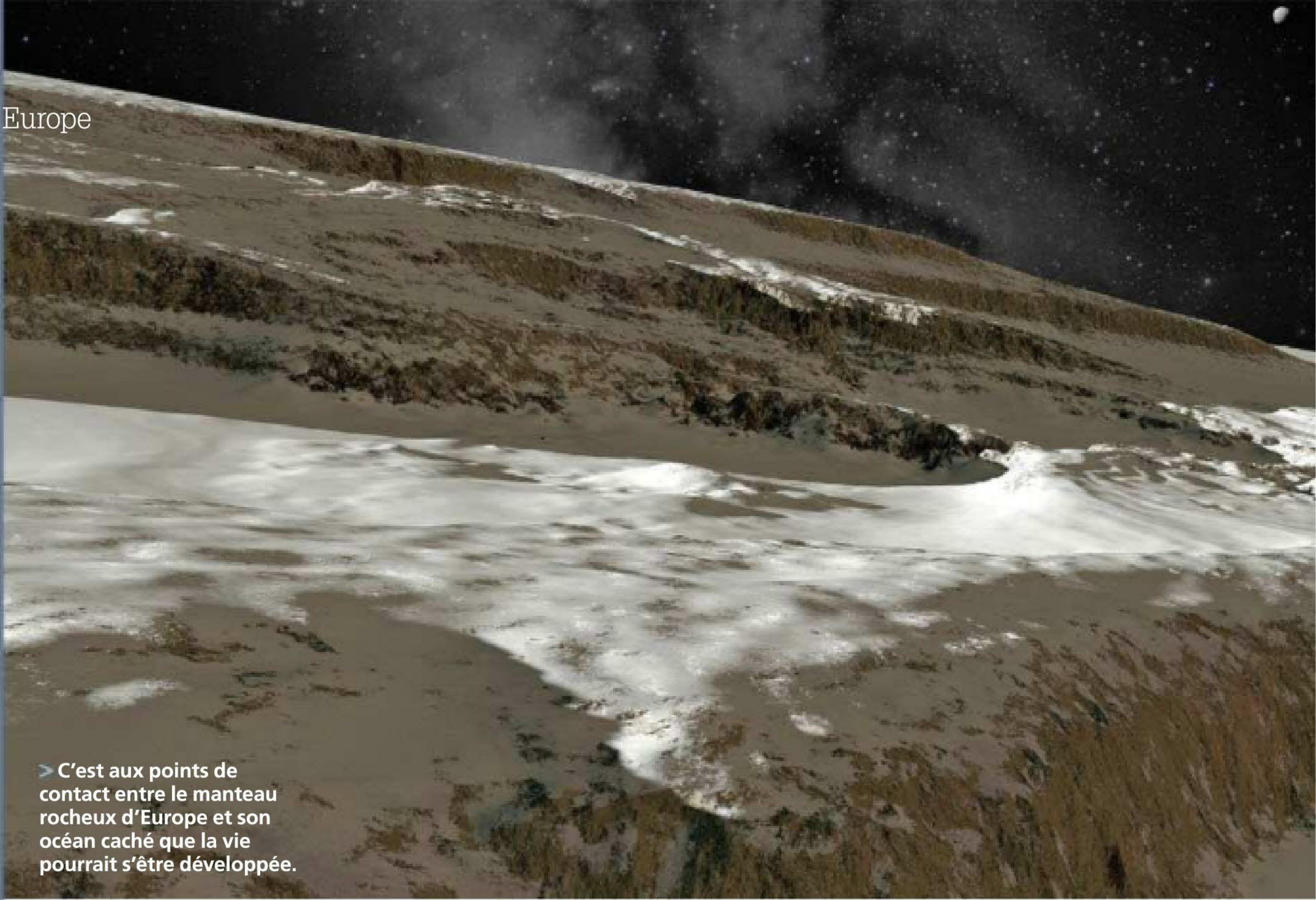
2 Libération de trois robots sous-marins

Après un à trois ans de forage (selon l'épaisseur de glace) à la vitesse de 1 m/h, le cryorobot atteindra l'océan sous-glaciaire. Il lâchera alors ses trois hydrorobots, sortes de poissons métalliques. Bardés de caméras et de capteurs, ils partiront à la découverte des fonds marins, et rechargeront régulièrement leurs batteries sur le cryorobot.



3 Recherche de traces de vie

C'est aux points de contact entre le manteau rocheux d'Europe et son océan salé que les robots chercheront des signes de vie. Car c'est à cette interface, semblable aux dorsales océaniques terrestres, qu'une forme de vie pourrait croître en trouvant les éléments nécessaires à son développement.



> C'est aux points de contact entre le manteau rocheux d'Europe et son océan caché que la vie pourrait s'être développée.

les scientifiques et planétologues, bien sûr, mais surtout les biologistes, ou plus exactement exobiologistes, ces savants qui cherchent la présence de formes de vie extraterrestres… Plus que Mars, désormais, Europe fascine, car son océan à l'abyssale profondeur pourrait abriter des formes de vie d'une inimaginable diversité. En l'absence de Soleil ? Oui ! Car sur Terre, la vie a conquis des territoires où la lumière et la chaleur de notre étoile ne se montrent jamais : grottes, fosses océaniques… Alors pourquoi pas l'océan d'Europe ? L'espoir de trouver de la vie sur – ou plutôt sous – Europe tient à ce que le manteau rocheux du petit astre est peut-être en contact direct avec l'océan salé : c'est à cette interface, semblable aux dorsales océaniques terrestres où la vie se développe, qu'une forme de vie « européenne » pourrait croître et embellir, en trouvant le soufre, le phosphore, le magnésium et le fer nécessaires à son développement.

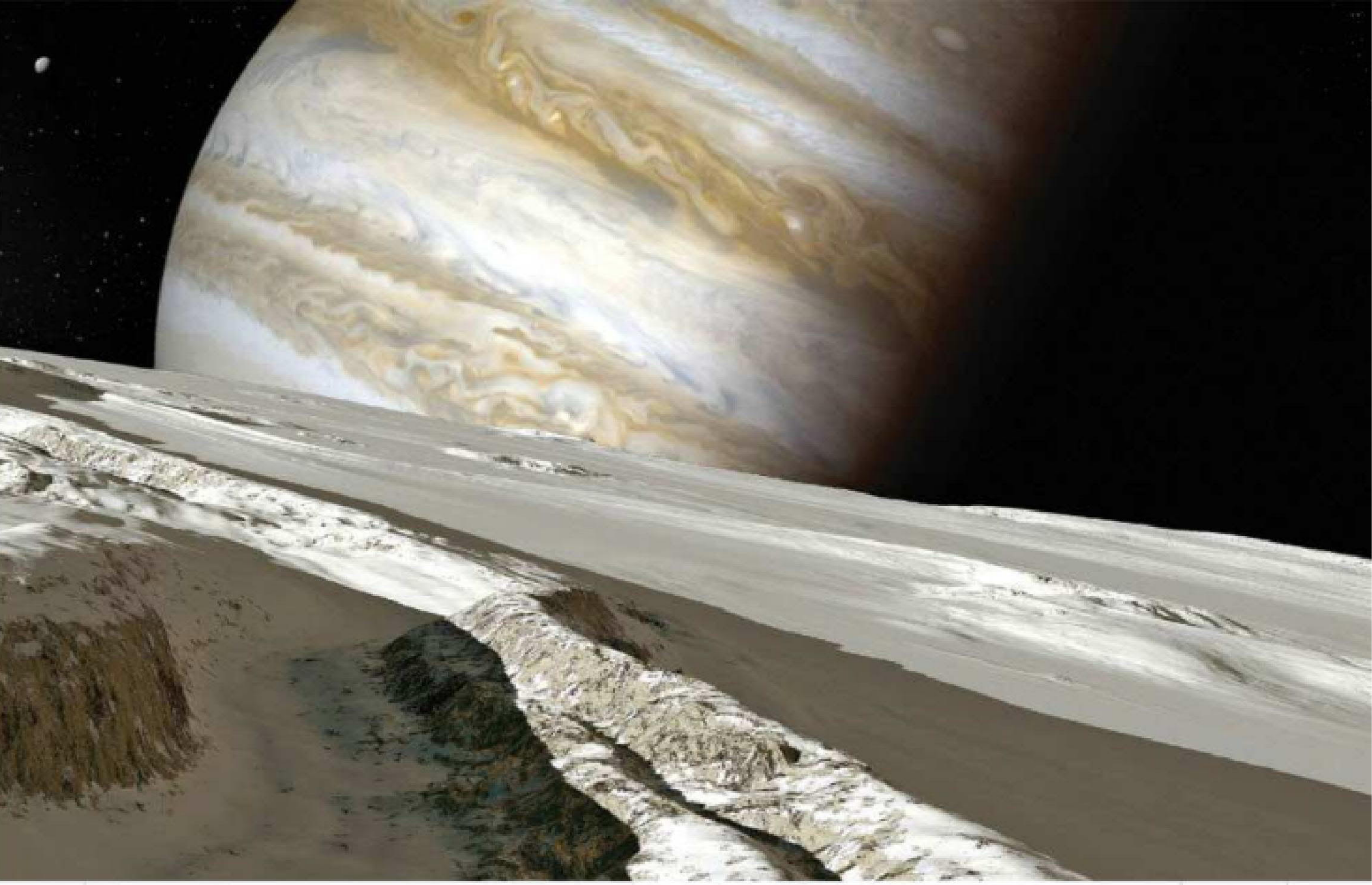
La Nasa a commencé à financer des programmes de recherche pour tester la faisabilité de missions sous-marines sur Europe

Le premier objectif de *Juice* et d'*Europa Mission* est ainsi de démontrer l'existence de cet océan et de déterminer où, exactement, il se situe sous la banquise d'Europe : à 5, 15, 30 kilomètres de profondeur ? Puis ces mêmes sondes, et l'éventuel *lander* américain, devront ensuite trouver où cet océan est en contact avec la surface. Car il y a, c'est sûr, des résurgences de l'eau ou de la glace profondes, comme en témoigne le matériau sombre que *Galileo* a photographié tout au long des lignes de fracture de la glace de surface. En 2013, le télescope spatial *Hubble* a même détecté la présence de geysers hauts de 200 kilomètres sur Europe, mais cette observation n'a jamais été reproduite ni confirmée… N'empêche : l'analyse de ce matériau venu des profondeurs et des possibles traces de vie qu'il contiendrait, ce sera la mission du possible *lander* de l'Europa Mission prévue par la Nasa pour la prochaine décennie.

Et après ? Que se passera-t-il si un module découvre des traces de vie ou des indices de traces de vie à la surface du satellite glacé de Jupiter ? Les scientifiques savent qu'ils n'auront d'autre choix que d'aller explorer l'océan se cachant sous la banquise d'Europe. Même si, aujourd'hui, un tel vœu relève de la science-fiction, les laboratoires commencent déjà à étudier la possibilité d'envoyer des robots chatouiller les tentacules des hypothétiques extraterrestres se cachant là-bas…

Comment faire ? Sur Terre, les géologues savent prélever des échantillons de glace ou de roche à

SPL/COSMOS



grande profondeur. Le record de forage actuel a été réalisé par les Soviétiques entre 1970 et 1989 : 12 kilomètres, dans la péninsule de Kola, non loin de Mourmansk. En Antarctique, dans la base russe de Vostok, des carottes glaciaires ont été prélevées à 3,6 kilomètres de profondeur. Mais à Kola comme à Vostok, de lourdes installations de forage, des dizaines d'ingénieurs et de techniciens et des années d'effort ont été nécessaires pour parvenir à ces exploits. Alors, sur Europe, à 500 millions de kilomètres de la Terre…

UNE GLACE DURE COMME DU GRANIT

Impossible, bien sûr, d'emmener là-bas des équipes de forage. C'est à des robots qu'il faudra confier la tâche herculéenne de tenter de percer la banquise. D'abord, en orbite, un satellite, pour transmettre les ordres des ingénieurs vers les robots et les données recueillies vers la Terre. Ensuite, au sol, une station, pour communiquer avec la Terre *via* le satellite en orbite. Et, enfin, un robot capable de percer une glace dure comme du granit sur des kilomètres ou des dizaines de kilomètres. Si un tel engin n'existe pas aujourd'hui, la Nasa a commencé à financer, à raison de quelques millions d'euros, des programmes de recherche et développement pour tester la faisabilité de missions sous-marines sur Europe.

C'est ainsi que la société Stone Aerospace a conçu le « cryorobot » Valkyrie (Very deep Autonomous Laser powered Kilowatt Ice Explorer), qui a été testé avec succès en 2015 sur le glacier Matanuska, en Alaska. Semblable à une ogive, l'engin mesure 1,6 mètre et pèse 100 kilos. Il s'enfonce verticalement dans la glace en la liquéfiant à l'aide d'un laser d'une puissance de 5 kilowatts, placé à l'avant. L'énergie nécessaire au robot et à son laser est délivrée par une fibre optique qui se déroule derrière lui au fur et à mesure qu'il s'enfonce. La fibre remonte par ailleurs vers la station au sol les informations collectées par le robot. Valkyrie a parfaitement fonctionné, descendant jusqu'à 30 mètres de profondeur dans le glacier. Aussi Bill Stone, son concepteur, est optimiste : *« Pour creuser 30 kilomètres de glace sur Europe, il faudrait équiper un super-Valkyrie d'un laser de plus de 250 kilowatts. Nous saurions le faire, c'est possible. »* Mais un robot comme Valkyrie ne pourrait pas explorer l'océan sous-glaciaire d'Europe et y traquer d'éventuelles formes de vie. Ce travail serait confié à de petits robots sous-marins qui seraient déployés dans l'eau une fois le forage achevé.

En 2013, les chercheurs américains Leigh McCue, David Allen, Matthew Jones, Craig Woolsey et William Moore ont rédigé, dans le cadre du programme Niac (Nasa Innovative Advanced Concepts), un rapport décrivant par le menu ce que pourrait être, dans le quart de siècle qui vient, une mission spatiale dans les eaux d'Europe. Le futur lanceur lourd de la Nasa, le *SLS*, serait utilisé pour envoyer vers



UN PREMIER TEST RÉUSSI EN ALASKA

Conçu par la société Stone Aerospace, le robot Valkyrie a été testé avec succès en 2015, sur le glacier Matanuska. L'engin, en forme d'ogive, est descendu dans la glace jusqu'à 30 m de profondeur, la liquéfiant à l'aide d'un laser placé à l'avant.

Jupiter une très grosse sonde modulaire, pesant près de 10 tonnes. À bord, le satellite destiné à se mettre en orbite autour d'Europe et le module d'atterrissage contenant le cryorobot, lui-même emportant trois hydrorobots. Des modules qui devront être ultraprotégés pour résister au puissant champ de radiation jovien.

ENTRE UN ET DEUX MÈTRES PAR HEURE

Une fois déployée au sol, la station, alimentée par un RTG (Radio-isotope Thermoelectric Generator) – c'est-à-dire une petite pile atomique alimentée au plutonium 238 comme celles qui équipent les sondes spatiales voyageant loin du Soleil –, libérera le cryorobot. La chaleur intense délivrée par le laser de celui-ci fera fondre progressivement la glace. Taux de descente : entre un et deux mètres par heure. À cette vitesse, et en fonction de l'épaisseur de banquise à traverser, le voyage sous-glaciaire du cryorobot durera entre un et trois ans…

au fond, la pression sera la même qu'au fond de l'océan terrestre. Ainsi, des mois d'exploration sous-marine pourront être entrepris par les chercheurs qui suivront de loin, depuis la Terre, les opérations. Celles-ci seront entièrement automatisées, car il sera impossible de communiquer en temps réel avec les robots. Un échange d'informations entre la Terre et Europe, à la vitesse de la lumière, prendrait plus de une heure…

Que cachent les profondeurs abyssales d'Europe ? Nous le saurons sans doute dans un quart de siècle environ… Reste une question décisive, que les promoteurs d'une mission à la recherche d'une vie sous la banquise d'Europe ne pouvaient pas éluder : n'y a-t-il pas un danger, en envoyant des engins dans l'eau du satellite de Jupiter, de contaminer celle-ci et de mettre en danger une éventuelle forme de vie « européenne », par l'introduction de bactéries et de virus terrestres ? Si, bien sûr, malgré toutes les opérations de décontamination qui seront entreprises sur les

En fonction de l'épaisseur de banquise à traverser, le voyage sous-glaciaire du robot durera entre un et trois ans…

Arrivé à la frontière entre la glace et l'eau liquide, le cryorobot libérera ses trois hydrorobots, sortes de dauphins métalliques. Bardés de caméras et de capteurs, ces engins partiront à la découverte des eaux d'Europe et viendront recharger leurs batteries sur le cryorobot. Naviguer dans les eaux profondes d'Europe ne devrait pas leur poser de problème particulier. En effet, le faible champ de gravité du satellite atténue la pression de l'eau : si l'océan d'Europe est profond de 100 kilomètres,

robots avant de les envoyer là-bas. Mais, en réalité, Europe est naturellement protégé des invasions extraterrestres par le champ de radiations mortel de Jupiter. Et les scientifiques comptent bien s'en servir pour stériliser leurs sondes. Au cours de leur traversée du système de Jupiter et à la surface même d'Europe, les robots de la Nasa subiront une dose de radiations suffisante pour éradiquer toute forme de vie terrestre avant de se lancer dans la recherche de la première forme de vie extraterrestre… ●

STONE AEROSPACE


SCIENCE&VIE
VOUS PRÉSENTE
DU 3 AU 12 OCTOBRE 2016
À partir de
1880 €
(10 jours /9 nuits)
VOL INCLUS AU DÉPART DE PARIS OU MARSEILLE
La croisière des grands
explorateurs
ET S SCIENTIFIQUES
• ATHÈNES • LES MÉTÉORES
• SANTORIN • LES CYCLADES
* programme non contractuel, susceptible d'évoluer
Avec la présence EXCEPTIONNELLE de :
Jean Louis Etienne*
Médecin, explorateur.
Yves Coppens*
Paléoanthropologue, professeur au Collège de France.
Françoise Gaill*
Spécialiste des Abysses et directeur de recherches au CNRS.
NOUVEAU
Le M/S Astoria, un navire de 260 cabines !

NETTOYER ET SÉCURISER L'ESPACE

Par Olivier Lapirot



MISSION KITE (AGENCE SPATIALE JAPONAISE)

FIN 2016

Prévue pour la fin de l'année, la mission Kite devrait permettre de tester le concept de longe électrodynamique.

ADRAS-1 (ASTROSCALE, SINGAPOUR)

2018

Emmené dans l'espace par le satellite de démonstration Adras-1, un satellite nettoyeur de 30 kg tentera de capter la cible qu'il aura apportée.

SLING-SAT (UNIVERSITÉ A&M DU TEXAS)

PAS AVANT 2020

Encore au stade théorique, ce modèle de satellite nettoyeur serait très économe en carburant, car il utiliserait l'énergie des débris.



Depuis l'envoi du premier satellite artificiel Spoutnik, en 1957, la banlieue terrestre est de plus en plus encombrée : des dizaines de milliers de débris orbitent autour de notre planète ! Filant à la vitesse de 36 000 km/h, ils menacent d'endommager les satellites de télécommunication et d'observation, les instruments scientifiques et même la Station spatiale internationale. La communauté spatiale redoute ainsi le « syndrome de Kessler » : le jour où ces débris deviendront si nombreux qu'ils provoqueront des collisions en cascade génératrices de nouveaux débris, au point de rendre l'utilisation des orbites autour de la Terre et toute exploration spatiale impossibles ! Pour éviter cela, et maintenir la situation en l'état, il suffirait d'enlever trois à cinq gros débris par an. Ainsi, l'Agence spatiale européenne, des universités et des entreprises privées imaginent des solutions pour récupérer certains débris et les faire redescendre dans l'atmosphère terrestre où ils se consumeront sous l'effet des frottements.

PROJET CLEANSPACE ONE (EPFL, SUISSE)

À L'HORIZON 2020

Piloté par l'École polytechnique fédérale de Lausanne, ce projet prévoit d'envoyer un satellite récupérer un nanosatellite en fin de vie.

UN CANON LASER POUR L'ISS (COOPÉRATION)

VERS 2025

Un canon laser grandeur nature devrait être installé en 2025 sur la station spatiale, après le test, en 2017, d'une version miniature.

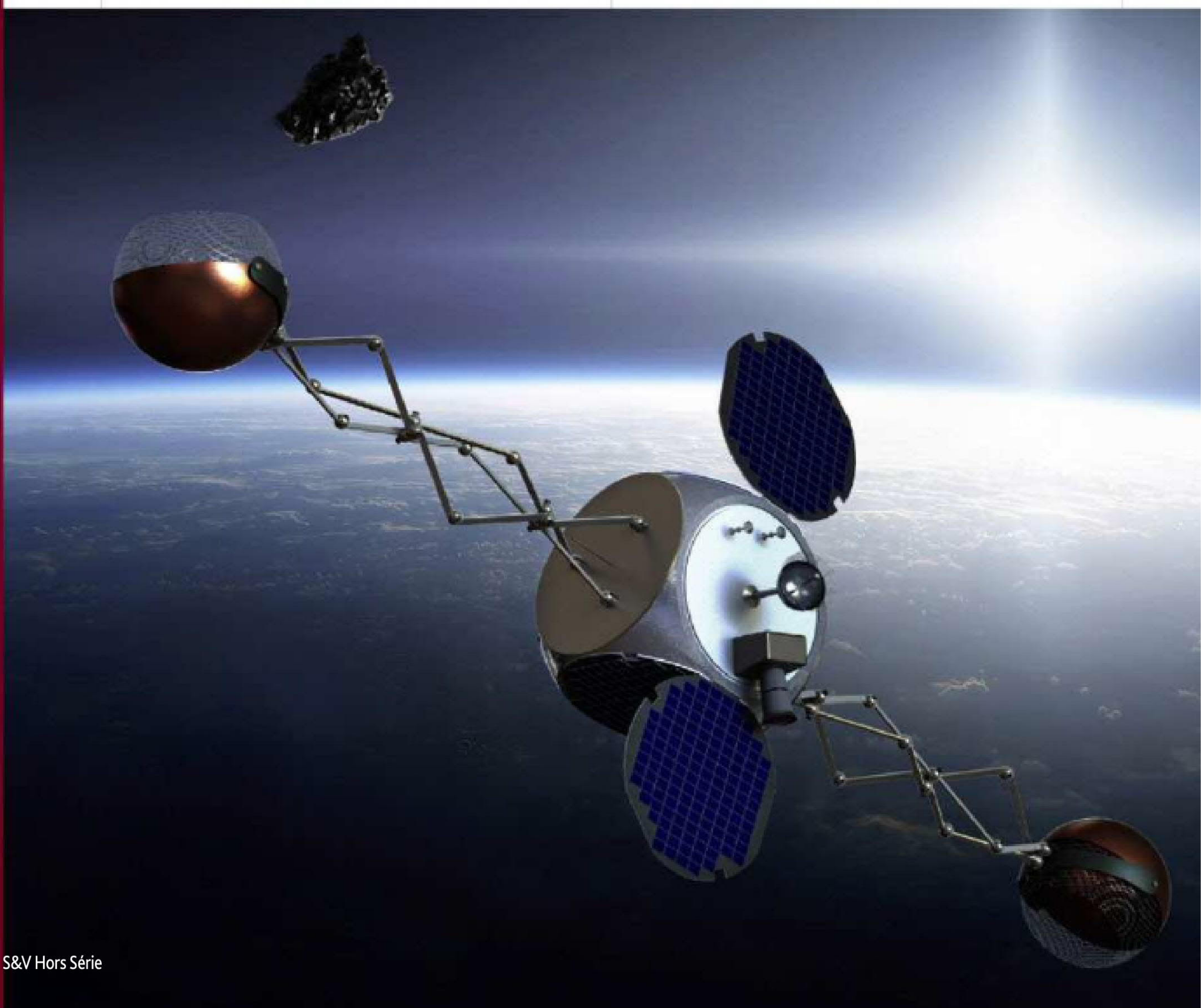
SHUTTERSTOCK



FIN 2016

Freiner les gros objets à l'aide d'une longe

Une façon de se débarrasser des débris spatiaux consiste à les ralentir : ils changent alors d'orbite pour une orbite plus basse, et finissent par atteindre l'atmosphère, où ils se consument. Dans cette optique, l'agence spatiale japonaise (Jaxa) a mis au point un système de freinage original et économe en énergie pour les plus gros débris spatiaux (satellites en fin de vie, étages de lanceurs…) : la longe électrodynamique. Il s'agit d'un filin en aluminium et en acier inoxydable, à fixer sur un débris. Le filin, à l'extrémité duquel est placé un émetteur d'électrons (un tapis de nanotubes de carbone), sert de câble conducteur. Les électrons présents dans l'espace circulent ainsi dans le filin, donnant naissance à un courant électrique. Or, quand le débris se déplace sur son orbite, la longe et son courant électrique coupent les lignes du champ magnétique terrestre, ce qui induit des forces de freinage électromagnétiques (forces de Lorentz) qui s'opposent à son mouvement. Prévue pour la fin de l'année, la mission Kite devrait permettre de valider cette technique de freinage. Une longe électrodynamique longue de 700 m sera installée, avant le décollage, sur le cargo japonais *HTV* qui doit ravitailler la Station spatiale internationale. Déployée dans l'espace à son retour, la longe devrait provoquer le désorbitage du vaisseau cargo et, à terme, sa destruction dans l'atmosphère. Par la suite, l'objectif de la Jaxa est de mettre au point un satellite capable d'aller attacher une longe sur les plus gros débris spatiaux. D'après les calculs, elle devra alors mesurer plusieurs kilomètres.





V Une longe électro-dynamique va être testée sur le cargo japonais *HTV.* Déployée sous le vaisseau, elle devrait le freiner jusqu'à le faire tomber dans l'atmosphère.

2018

Attraper les débris en les collant

Basée à Singapour, la société Astroscale développe une solution originale pour la collecte des débris spatiaux. Pour les attraper, ni bras mécanique ni filet, systèmes qu'elle juge trop lourds, trop onéreux et trop complexes à mettre en œuvre. À la place, un satellite nettoyeur doté d'une tête adhésive de 30 cm de diamètre, inclinable (pour s'adapter au mieux à sa cible lors de la rencontre), et composée de 21 coussinets préencollés. À base de silicone, la substance adhésive a été testée sur Terre sous vide d'air. Prochaine étape : dans l'espace, lors de la mission programmée en 2018. Le satellite de démonstration *Adras* déploiera une cible et un petit satellite colleur de 30 kg. À terme, Astroscale projette de fabriquer un satellite colleur autonome dont le mode de propulsion et la tête adhésive varieront selon le type de débris à récupérer (du nanosatellite hors d'usage aux étages de fusée) et leur orbite. L'entreprise vise en particulier les modèles défaillants des flottes de satellites que des entreprises comme SpaceX et OneWeb comptent déployer à 1200 km d'altitude pour offrir un accès internet sur toute la surface du globe. Les premiers encollages commerciaux pourraient avoir lieu en 2022.



< Imaginé par des chercheurs texans, *Sling-Sat* capturerait un débris avec l'un de ses bras avant de l'envoyer vers l'atmosphère terrestre.

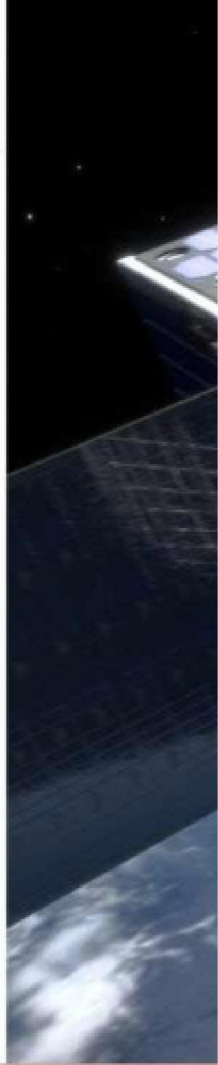
PAS AVANT 2020

Utiliser leur énergie pour les éliminer

Parce que les débris spatiaux se déplacent à grande vitesse, ils ne sont pas seulement un problème : ils sont aussi une source potentielle d'énergie ! Pourquoi, alors, ne pas en profiter ? Telle est l'idée qu'ont eue un chercheur et un étudiant de l'université A&M du Texas : ils ont imaginé un satellite nettoyeur capable d'éliminer plusieurs débris tout en étant économe en carburant en se faisant tracter par eux. Concrètement, leur modèle *Sling-Sat* se compose d'une partie centrale de part et d'autre de laquelle se déploient deux bras, munis à leur extrémité d'un récepteur en forme de bol. À la manière d'une fronde, le satellite capture un débris avec un de ses bras, qui bascule et le relâche au moment opportun vers l'atmosphère terrestre. Grâce à cette astuce, non seulement le satellite ne s'alourdit pas au fil de la mission, mais il utilise pour se déplacer l'impulsion conférée d'abord par la capture du débris mobile, puis par son rejet. La longueur des deux bras est ajustable, ce qui permet au satellite de modifier le centre d'inertie de l'ensemble qu'il forme avec le débris, de contrôler la vitesse et l'angle d'éjection, et de modifier sa trajectoire afin d'atteindre le prochain débris. Ainsi, *Sling-Sat* « rebondit » d'un débris à l'autre à peu de frais. Il communiquerait en continu avec le sol où tous les calculs de trajectoire seraient effectués. L'étude théorique est bouclée et les algorithmes de calculs sont prêts. Mais il reste des questions techniques à trancher, comme la réalisation des récepteurs et leur mécanisme de capture. Ils pourraient être tapissés d'un revêtement ultrarésistant en kevlar et en céramique, comme il en existe sur l'ISS.

JAXA - J. MISSEL







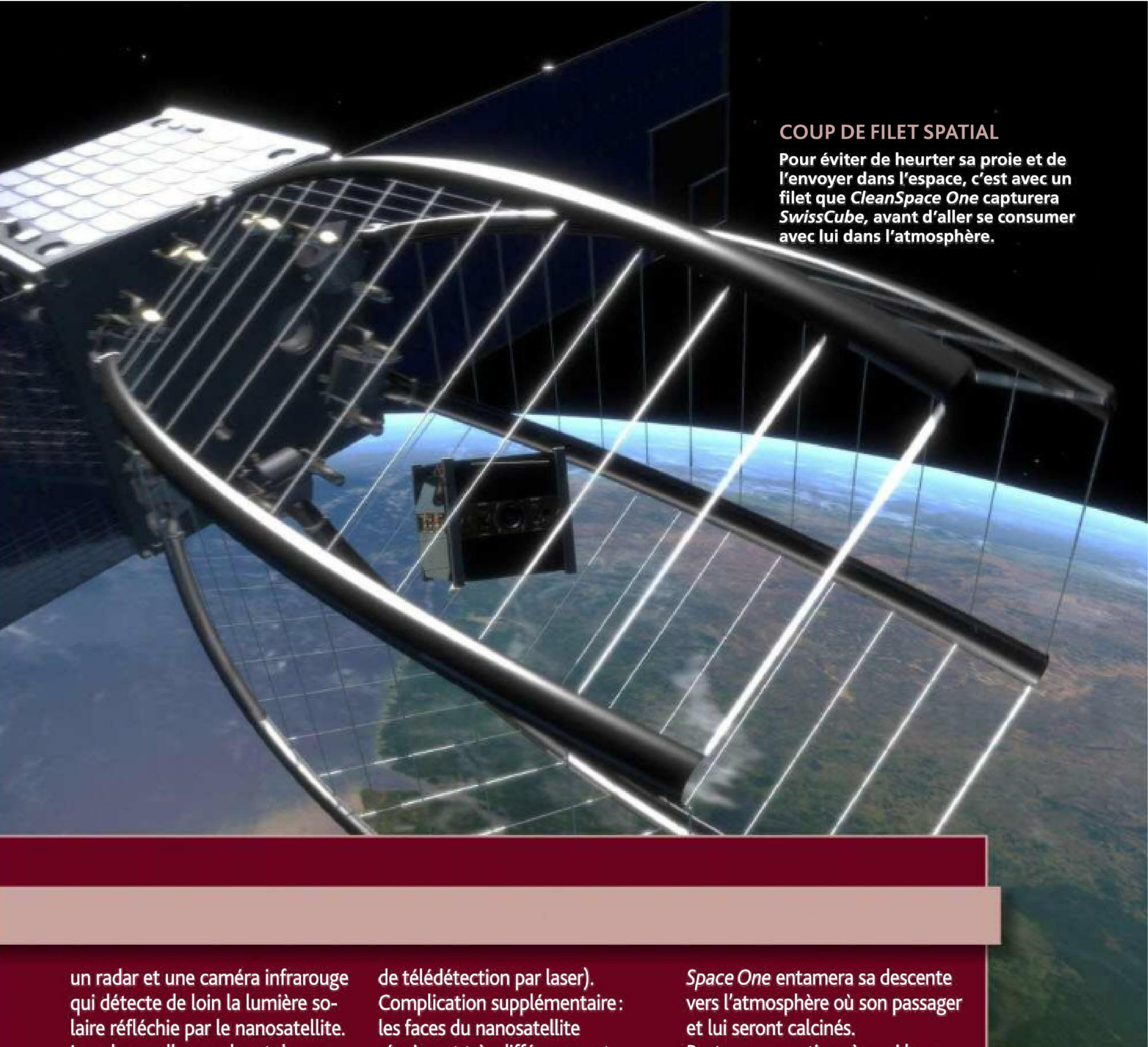
À L'HORIZON 2020

Neutraliser un objet précis

Ni américaine, ni européenne, ni russe : la première mission effective de nettoyage spatial pourrait bien être suisse. En effet, le projet CleanSpace One, qui prévoit d'envoyer à l'horizon 2020 un satellite pour qu'il débarrasse l'espace du satellite *SwissCube* quand il sera en fin de vie, est piloté par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Lancé en 2009 à 720 km d'altitude, *SwissCube* fut le premier satellite aux couleurs de la Confédération helvétique. Il s'agit d'un CubeSat : un nanosatellite de 10 cm de côté, pesant moins de 1 kg, dont la mission est d'observer les phénomènes de luminescence provoqués par l'entrée des particules énergétiques solaires dans l'atmosphère. Il a été conçu et fabriqué par 200 étudiants de l'EPFL. *« Le but était d'abord éducatif. C'est une manière d'améliorer l'enseignement en ingénierie spatiale »*, témoigne Muriel Richard-Noca, responsable du projet.

Puis la mission de récupération s'est imposée d'elle-même. Quelques mois avant le lancement de *SwissCube*, un accident est en effet survenu sur sa future orbite : deux satellites sont entrés en collision, provoquant une nuée de dangereux débris. Depuis que *SwissCube* a été mis en orbite, il est alerté au moins une fois par mois par le réseau de surveillance dédié aux objets en orbite autour de la Terre d'une possible collision avec ces débris ! Dépourvu de système de propulsion, le nanosatellite serait incapable de se dérouter. Par chance, il n'a pas encore été percuté. Mais ce risque a sensibilisé les responsables de l'EPFL, qui ont décidé de ne pas laisser un déchet de plus dans l'espace. *« Il s'agit de développer de nouvelles technologies, mais aussi de faire prendre conscience aux étudiants – les ingénieurs du spatial de demain – du problème des débris spatiaux, qu'il faudrait prendre en compte dès la conception des projets »*, insiste l'ingénieure.

Plus facile à dire qu'à faire. Car la mise en pratique du principe du satellite nettoyeur s'est révélée ardue. Première difficulté, la faible précision des informations sur l'emplacement du nanosatellite fournies par les radars au sol. Cela revient à trouver un cube de 10 cm dans une sphère de 5 km de rayon. Pour repérer sa cible, le satellite *CleanSpace One* associe ainsi



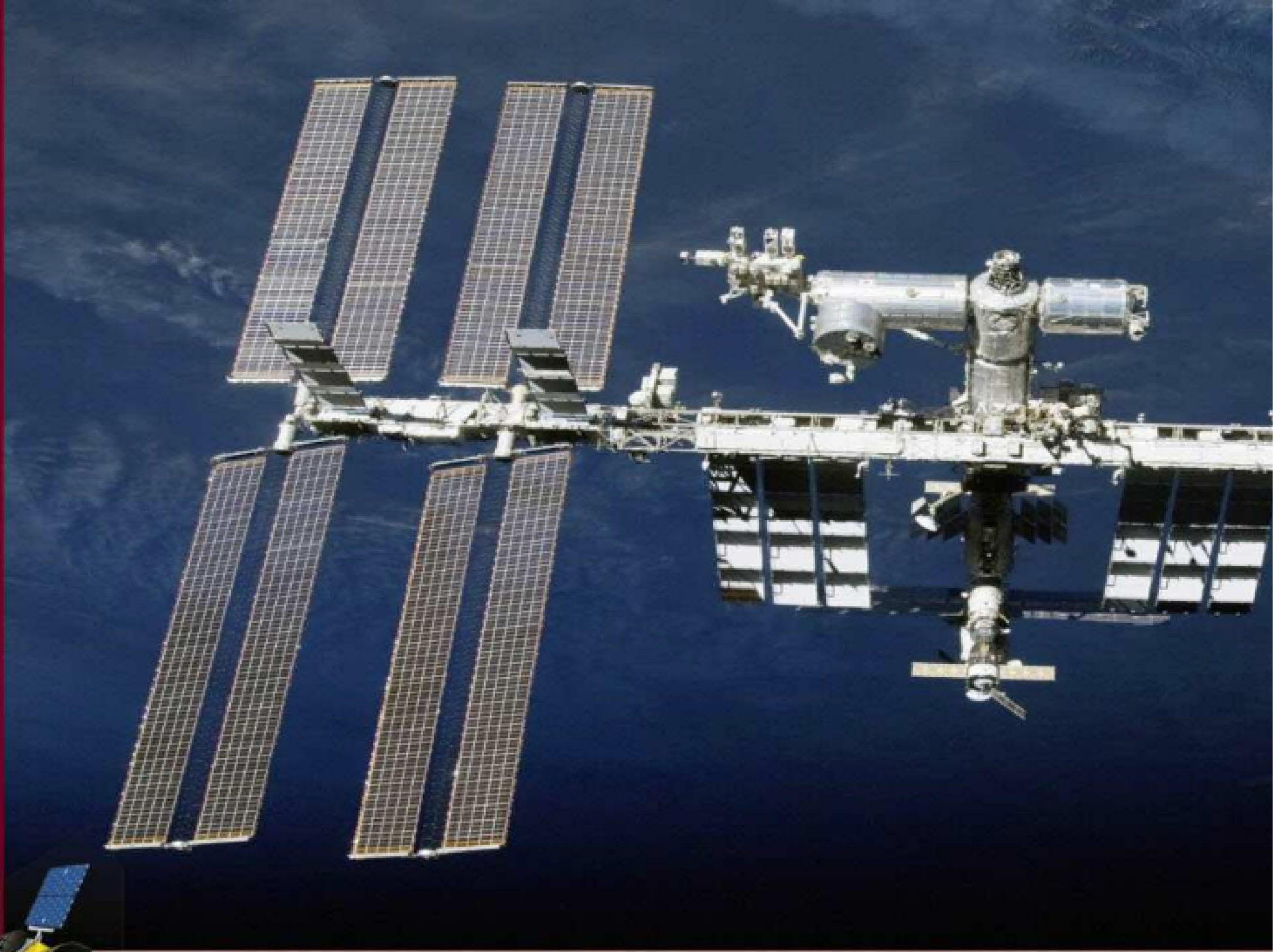
COUP DE FILET SPATIAL
Pour éviter de heurter sa proie et de l'envoyer dans l'espace, c'est avec un filet que *CleanSpace One* capturera *SwissCube*, avant d'aller se consumer avec lui dans l'atmosphère.

un radar et une caméra infrarouge qui détecte de loin la lumière solaire réfléchie par le nanosatellite. Les phases d'approche et de capture seront, elles aussi, délicates: *SwissCube* tournoiera sans doute sur lui-même (du fait de sa forme et des frottements) et, contrairement à l'ISS qui communique avec les vaisseaux *Soyouz* lors de leur arrimage, n'apportera aucune aide.

LA SOLUTION DU « PAC-MAN »

CleanSpace One doit s'approcher avec précision et en douceur du nanosatellite. Car s'il le percute, il l'éjectera dans l'espace…
Les étudiants travaillent donc sur un système de vision capable d'apprécier la distance et la rotation de *SwissCube*. Il associe une caméra classique, une caméra 3D et un flash Lidar (un système de télédétection par laser).
Complication supplémentaire: les faces du nanosatellite réagissent très différemment à la lumière. Celles portant les panneaux solaires sont opaques, tandis que les autres, dévoilant la structure en aluminium, réfléchissent fortement la lumière.
Les algorithmes d'analyse d'images doivent donc s'adapter à ces forts contrastes de luminosité.
Après plusieurs études, c'est la solution du « Pac-Man » qui a été retenue pour la capture: un filet conique en kevlar que *CleanSpace One* déploiera sur des tiges flexibles (en métal ou en carbone, c'est encore à l'étude).
Une fois le nanosatellite dans ses mailles, le filet se resserrera autour de sa proie pour l'immobiliser.
Grâce à ses propulseurs, *CleanSpace One* entamera sa descente vers l'atmosphère où son passager et lui seront calcinés.
Reste une question: à quoi bon fabriquer et lancer un satellite de 80 kg, pour un coût total estimé à 25 millions d'euros, pour faire disparaître un nanosatellite de 1 kg ? « CleanSpace One *a pour but de démontrer les possibilités technologiques d'un tel procédé,* répond Muriel Richard-Noca.
*Le système de capture par filet conique n'est certes pas applicable aux plus gros débris comme les étages de fusée, mais il est efficace pour les satellites jusqu'à 500 kg, qui sont en pleine expansion.
Quant au système de vision, il sera utilisable dans tous les cas.* » Si le projet réussit, les élèves ingénieurs suisses pourront se targuer d'avoir participé à une première spatiale.

EPFL





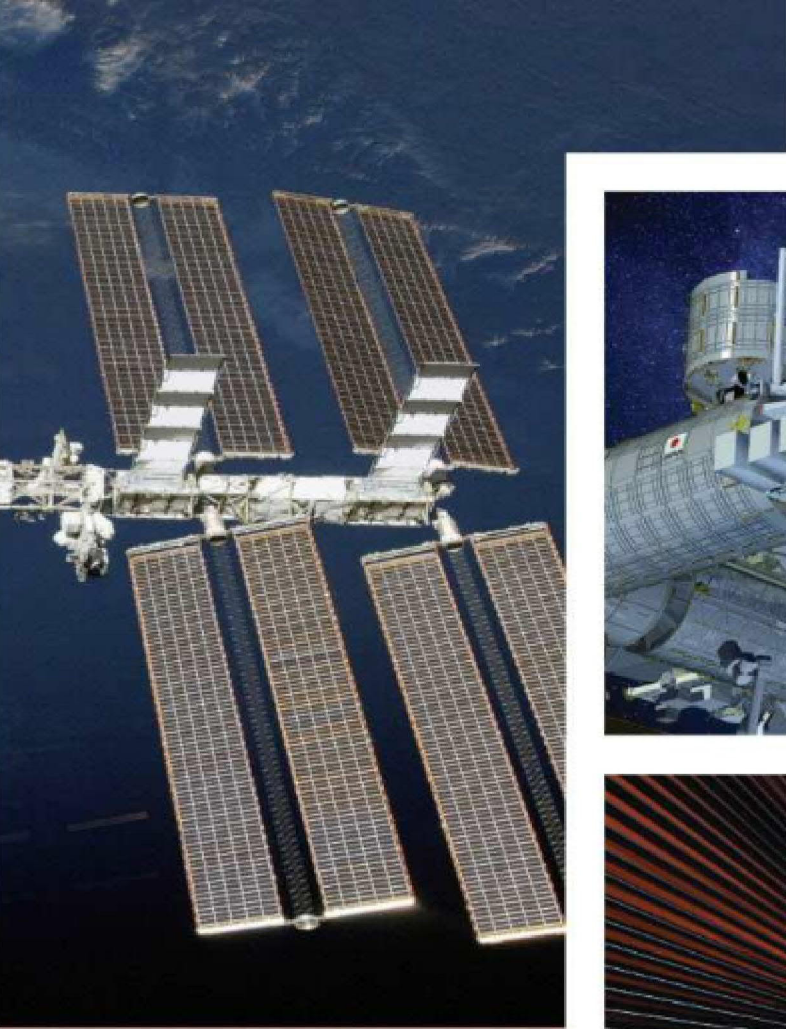
VERS 2025

Équiper l'ISS d'un canon laser

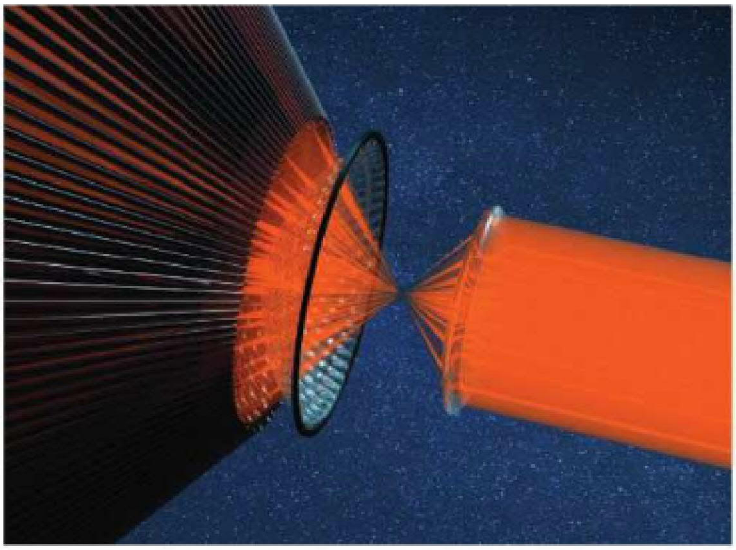
Pour protéger la Station spatiale internationale des débris qui la menaceraient, des scientifiques ont eu l'idée d'associer deux outils. Repérés par un télescope, les objets seraient ensuite poussés en direction de l'atmosphère par un laser.

Dans le film *Gravity* (2013), la destruction de la Station spatiale internationale (ISS) est spectaculaire. À l'origine de la catastrophe : l'explosion d'un satellite russe, qui déclenche une réaction en chaîne. Projetés à grande vitesse dans l'espace, les fragments du satellite détruisent d'autres satellites sur leur trajectoire, créant une nuée de nouveaux débris qui viennent déchiqueter l'ISS…

Pure fiction ? Pas tout à fait. Le scénario, catastrophique comme Hollywood les affectionne, repose sur un risque réel. Le 16 juillet 2015, pour la quatrième fois de l'histoire de l'ISS, l'équipage est allé se réfugier préventivement dans le vaisseau *Soyouz* arrimé à la station. Un débris était susceptible







UN LASER ET UN TÉLESCOPE

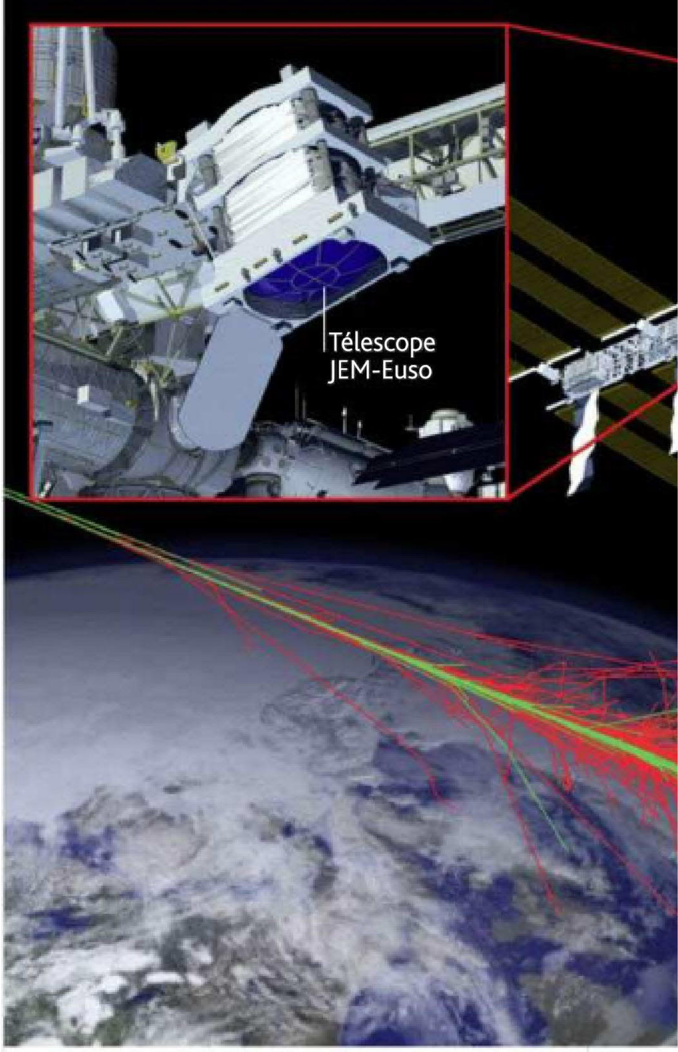
L'association du télescope JEM-Euso *(en haut)* et du laser CAN pourrait constituer un moyen de défense efficace: une fois repéré par le télescope, un débris pourrait être repoussé par le laser en direction de l'atmosphère terrestre, où il se consumerait.

de traverser la zone de sécurité, une région de 50 x 50 x 1,5 km avec, en son centre, la station, grande comme un terrain de football. La plupart du temps, ces rencontres sont calculées suffisamment à l'avance pour modifier l'orbite de l'ISS. Mais cette fois, le temps a manqué. Le fragment en question provenait de la collision, en 2009, de deux satellites de télécommunication, le russe *Kosmos 2251*, hors service, et l'américain *Iridium 33*. Accident qui engendra 2 269 morceaux en orbite, selon le décompte du catalogue des objets spatiaux, tenu par l'armée américaine. Le risque de collision avec l'ISS fut pris très au sérieux, comme il l'est pour tous les instruments et satellites en orbite autour de la Terre. Ainsi, au sol, 29 télescopes et radars, répartis sur tout le globe, traquent en permanence les objets de plus de 10 cm. Finalement, l'ISS n'a pas été touchée et l'équipage a pu la réintégrer.

Le détail du catalogue des objets spatiaux révèle l'ampleur du problème. Sur les 18 000 objets qu'il recense (d'une taille supérieure à 10 cm), seuls 1 100 (6 %) sont des satellites actifs. Le reste se compose de 3 300 satellites hors service, de 2 200 étages supérieurs (vestiges des fusées qui les ont mis en orbite), de 2 400 objets divers relâchés volontairement dans l'espace (tels que les caches de protection des lentilles des télescopes spatiaux ou les coques de séparation des lanceurs) et, surtout, de débris issus de l'explosion ou de la dégradation des objets déjà cités. Des débris qui représentent

NASA - JEM-EUSO - PHIL SAUNDERS GRAPHICS

la moitié des objets en orbite dans l'espace ! Ainsi, rappelle Christophe Bonnal, chercheur au Cnes et coprésident de la commission des débris spatiaux de l'Académie internationale d'astronautique (IAA), *« en novembre 1986, l'étage supérieur de la fusée* Ariane, *qui avait placé neuf mois avant le satellite* Spot-1 *en orbite, a explosé, créant 700 nouveaux gros débris dans l'espace. La protection thermique s'est dégradée, le Soleil a fait bouillotter le carburant résiduel et, sous la pression, la paroi a cédé. »*



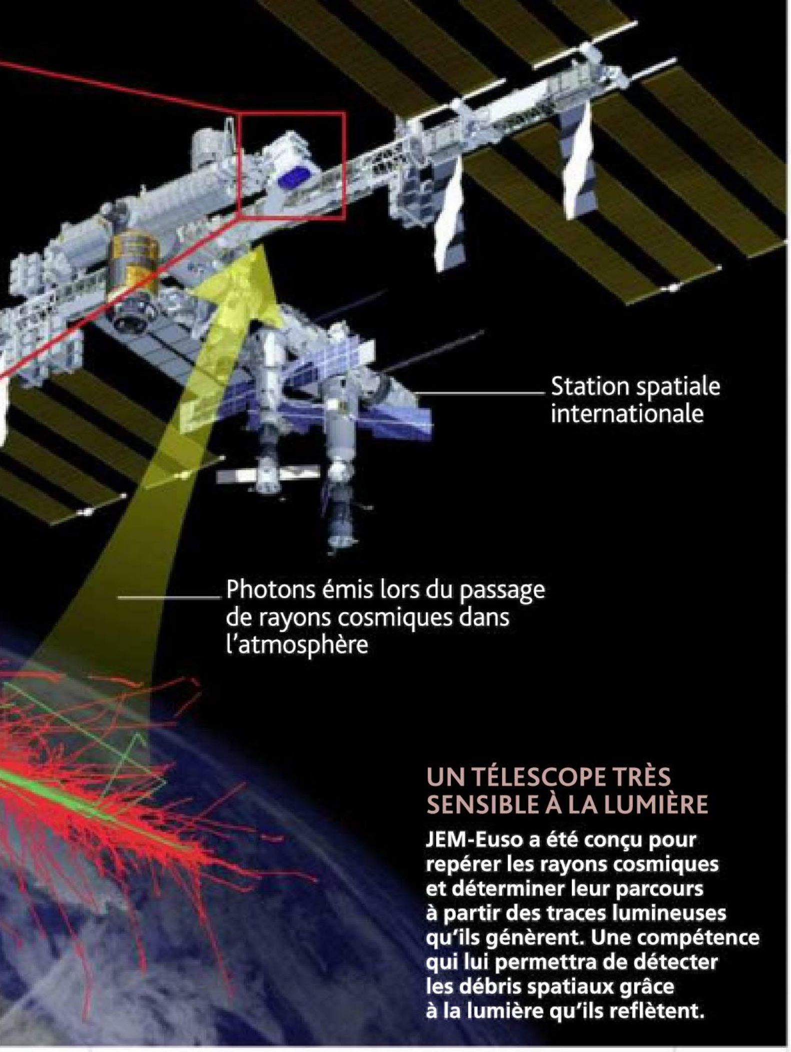
DES MILLIONS DE PETITS DÉBRIS

Grâce au suivi quasiment en direct des gros débris, il est heureusement possible de dérouter l'ISS ou les satellites dont ils s'approcheraient trop. Mais ces objets sous haute surveillance ne sont pas les seuls à circuler. Il faut encore ajouter pas moins de 720 000 débris entre 1 et 10 cm, et même 135 millions de débris plus petits qu'une bille ! Parce qu'ils sont impossibles à traquer en raison de leur taille, leur nombre a été estimé à partir des impacts relevés sur la navette américaine durant son exploitation ou sur le télescope *Hubble*. Pour être tout petits, ces innombrables déchets ne représentent pas moins une menace, car ils filent dans l'espace à la vitesse folle de 10 km/s, soit 36 000 km/h ! Avec l'énergie cinétique engrangée à cette vitesse, une particule de 1 millimètre équivaut ainsi à une boule de bowling lancée à 100 km/h, et une bille, à une grosse voiture lancée à 130 km/h ! Les dégâts liés à un impact sont donc potentiellement considérables, allant de la panne à la pulvérisation pure et simple.

Depuis le lancement de *Spoutnik*, le premier satellite artificiel, en 1957, *« on a recensé six collisions catastrophiques (c'est-à-dire créant des centaines de débris) entre des objets catalogués. En revanche, on en suspecte une soixantaine entre un objet catalogué, typiquement un satellite, et un débris non-référencé »*, détaille M. Bonnal. Si la situation est de plus en plus préoccupante, le niveau d'encombrement varie avec l'altitude. Ce sont les orbites basses, situées entre 700 et 1 100 km, qui sont les plus polluées. Elles accueillent les satellites d'observation terrestre, météorologiques et de téléphonie. L'ISS, elle, se déplace en dessous de l'essentiel des débris spatiaux, sur une orbite située entre 350 et 400 km d'altitude. Mais en raison de ses passagers humains, elle bénéficie d'une attention toute particulière. D'où l'urgence de trouver un moyen permettant de protéger la Station spatiale internationale des débris indétectables par les systèmes de contrôle au sol, ceux d'une taille inférieure à 10 cm. Un moyen digne des films de science-fiction, puisqu'il s'agit d'équiper l'ISS d'un canon laser !

Capable de repérer un objet de 1 cm à une distance de 140 km et un objet de 10 cm à 1 000 km, le télescope servira de viseur

Cette idée est née de l'association de deux projets qui, au départ, n'avaient rien en commun. Le premier est le télescope *JEM-Euso*, dont l'installation est prévue dans le laboratoire japonais de l'ISS. À l'origine, ce télescope doit observer les rayons cosmiques, ces flux de particules à ultrahaute énergie qui circulent dans l'espace. *« Quand les rayons cosmiques traversent l'atmosphère terrestre, ils créent des gerbes de particules en cascade jusqu'à épuisement de leur énergie initiale »*, explique Étienne Parizot, astrophysicien à l'université Paris-Diderot. Ces nouvelles particules excitent à leur tour les molécules présentes dans l'atmosphère qui, au moment de reprendre leur état initial, émettent de la lumière fluorescente dans les ultraviolets. Équipé d'une lentille de 2,5 m de diamètre et d'un capteur



UN TÉLESCOPE TRÈS SENSIBLE À LA LUMIÈRE

JEM-Euso a été conçu pour repérer les rayons cosmiques et déterminer leur parcours à partir des traces lumineuses qu'ils génèrent. Une compétence qui lui permettra de détecter les débris spatiaux grâce à la lumière qu'ils reflètent.

JEM-EUSO/RIKEN

de 350 000 pixels, *Euso* peut repérer ces traces lumineuses. *« De la même manière qu'il détecte les traces des rayons cosmiques,* Euso *est capable de percevoir la lumière rasante du Soleil réfléchie par les débris »*, reprend le chercheur. Au lieu de pointer le télescope vers la Terre et l'atmosphère, il s'agit de l'orienter vers l'avant de l'ISS, afin de détecter les débris circulant dans la direction de la station.

UN NOUVEAU TYPE DE LASER

D'après les calculs (qui prennent en compte les matériaux avec lesquels sont fabriqués les objets spatiaux, leur réflectivité et le flux de lumière solaire), la quantité de lumière réfléchie sera suffisante : *« Le télescope sera capable de repérer un objet de 1 cm à une distance de 140 km, et un objet de 10 cm à 1 000 km »*, poursuit Étienne Parizot. Il servira de viseur ultrasophistiqué : une fois le débris dans son champ de vision, son électronique calculera la trajectoire en une fraction de seconde et prédira où il se situera l'instant d'après.

Le deuxième projet n'avait, lui, rien de spatial au départ. Il s'agit d'un nouveau type de laser, le laser CAN. Il diffère du laser conventionnel par son système d'amplification de la lumière : ce sont des fibres optiques en très grand nombre qui assurent cette fonction, à la place de la barre de verre ou de saphir usuelle. *« Chaque fibre émet la même lumière amplifiée que les autres. À la sortie, les faisceaux se recombinent en une lumière unique, cohérente et de très grande puissance »*, explique Gérard Mourou, directeur du centre de recherche consacré au laser et à ses applications de l'École polytechnique. Plus facile à refroidir qu'un laser conventionnel, le laser CAN est capable de tirer à une fréquence très élevée, de l'ordre de 10 000 impulsions par seconde ! C'est d'ailleurs pour cela qu'il est destiné à transmettre l'énergie nécessaire aux particules dans les futurs accélérateurs.

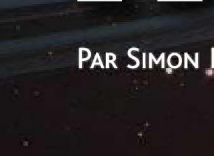
Dans le cas des débris spatiaux, le laser CAN présente un premier avantage : il prend moins de place qu'un laser conventionnel et son efficacité électrique est meilleure. *« Sur l'ISS, une source d'énergie d'une dizaine de kilowatts suffit pour alimenter un laser CAN d'une puissance de quelques kilowatts »*, complète le physicien. Mais pas question de faire exploser le débris : *« Il s'agit de lui donner une pichenette pour le ralentir et, ainsi, modifier sa trajectoire. »* En pratique, le laser vaporisera une infime quantité de la matière du débris. Ce jet de gaz propulseur s'opposant à la direction dans laquelle se déplace le débris, il le freinera et, en conséquence, le fera désorbiter. Le débris descendra et rejoindra l'atmosphère, où il brûlera. Néanmoins, avec des débris qui foncent à une vitesse de 8 km/s, il faut ajuster le tir très vite. C'est là que le laser CAN possède un autre avantage : on peut en changer la focale (le point de concentration de l'énergie) très rapidement, par modification de la phase des faisceaux qui circulent dans les fibres optiques.

Sur le papier, l'association du télescope *JEM-Euso* et du laser CAN constitue un moyen de défense efficace. L'installation sur l'ISS d'une version miniature du futur *JEM-Euso* (avec une lentille de 20 cm) est prévue pour 2017. Les équipes de recherche souhaitent profiter de l'occasion pour embarquer aussi un laser CAN de 100 fibres optiques. Une fois que le canon laser modèle réduit aura fait ses preuves, ils espèrent équiper quelques années plus tard la station avec le télescope grandeur nature et un puissant laser CAN de 10 000 fibres. *« Le système laser complet mesurera 10 m de long »*, confie Gérard Mourou. À l'horizon 2030, l'ultime déclinaison de la solution prendra la forme d'un satellite autonome équipé du laser, dont la mission sera de nettoyer les orbites basses les plus encombrées. À moins que, d'ici là, un autre aspirateur à débris ait déjà fait le ménage… ●



OUVRIR L'ESPACE AU TOURISME

Par Simon Devos



NEW SHEPARD (BLUE ORIGIN, ÉTATS-UNIS)

PAS AVANT 2017

Développée par une société américaine, cette fusée réutilisable devrait réaliser son premier vol habité à 100 km d'altitude l'année prochaine.

B330 (BIGELOW AEROSPACE, ÉTATS-UNIS)

PAS AVANT 2020

Après un premier test réalisé avec succès cette année, ces deux modules gonflables devraient doubler la capacité d'hébergement de l'ISS en 2020.

INSPIRATION MARS (DENNIS TITO, ÉTATS-UNIS)

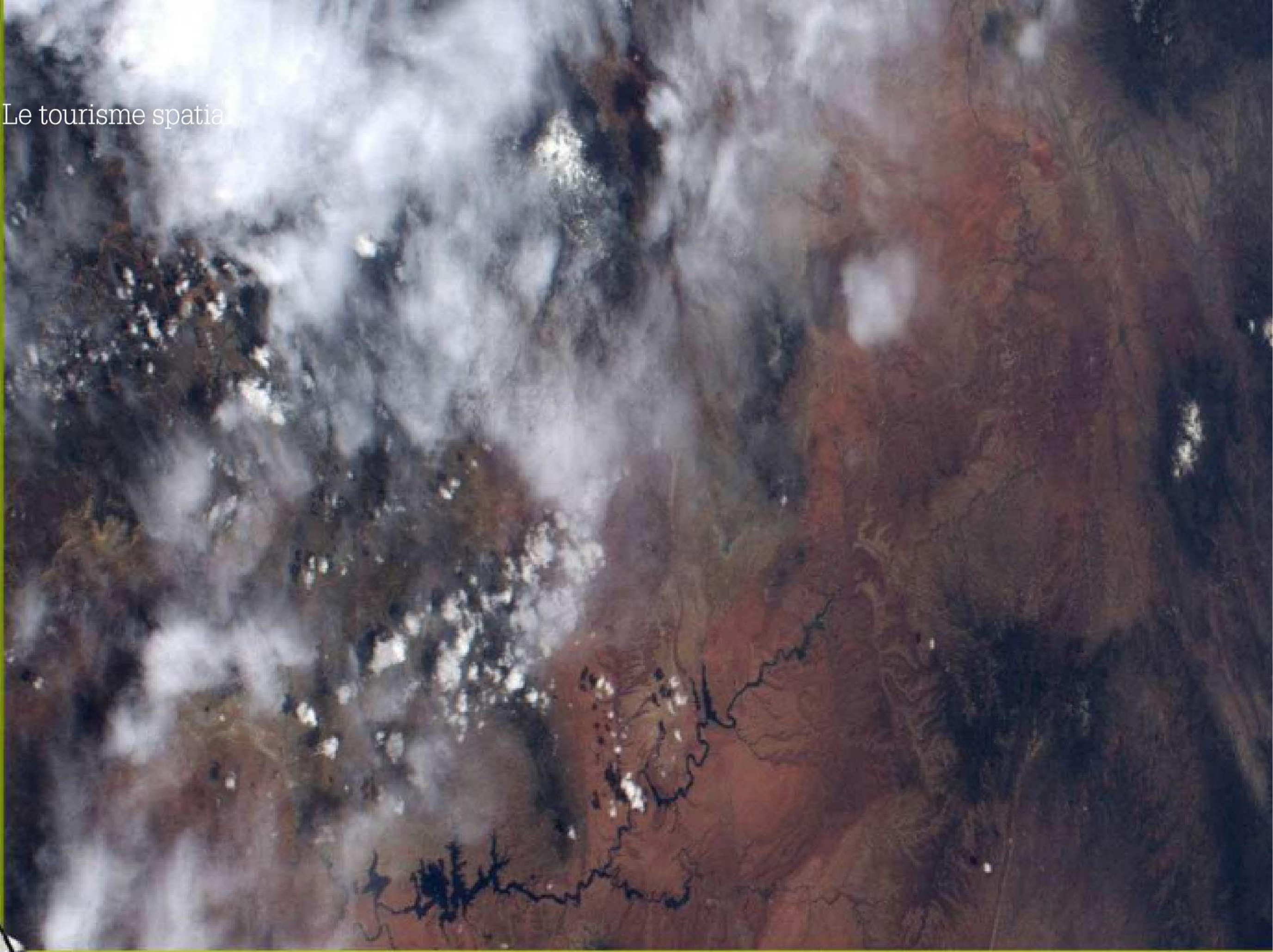
PAS AVANT 2021

Encore en manque de financement, ce projet fou prévoit d'envoyer deux touristes pour un vol aller-retour vers la planète rouge.



Qui n'a jamais rêvé d'espace? Sur notre petite planète bleue perdue dans l'immensité de l'Univers, nous sommes aujourd'hui comme des naufragés sur une île paradisiaque : satisfaits de notre habitat, mais frustrés de ne pas faire l'expérience du reste du monde. Gagarine, Armstrong et d'autres pionniers ont bien ouvert une porte. Mais, après eux, combien ont quitté la Terre pour un voyage dans l'espace? À peine 500 astronautes, en cinquante-cinq ans de vol spatial habité. Aujourd'hui encore, les technologies sont très onéreuses et les missions ne sont pas sans risques. Mais le XXIe siècle pourrait bien marquer un tournant décisif dans le développement de l'exploration spatiale. Plusieurs entreprises mettent au point des prototypes d'avions suborbitaux, de fusées et même de stations spatiales pour permettre un jour à un plus large public d'accéder aux merveilles du cosmos. Passage en revue de ces projets qui préparent le tourisme spatial de demain.

SHUTTERSTOCK

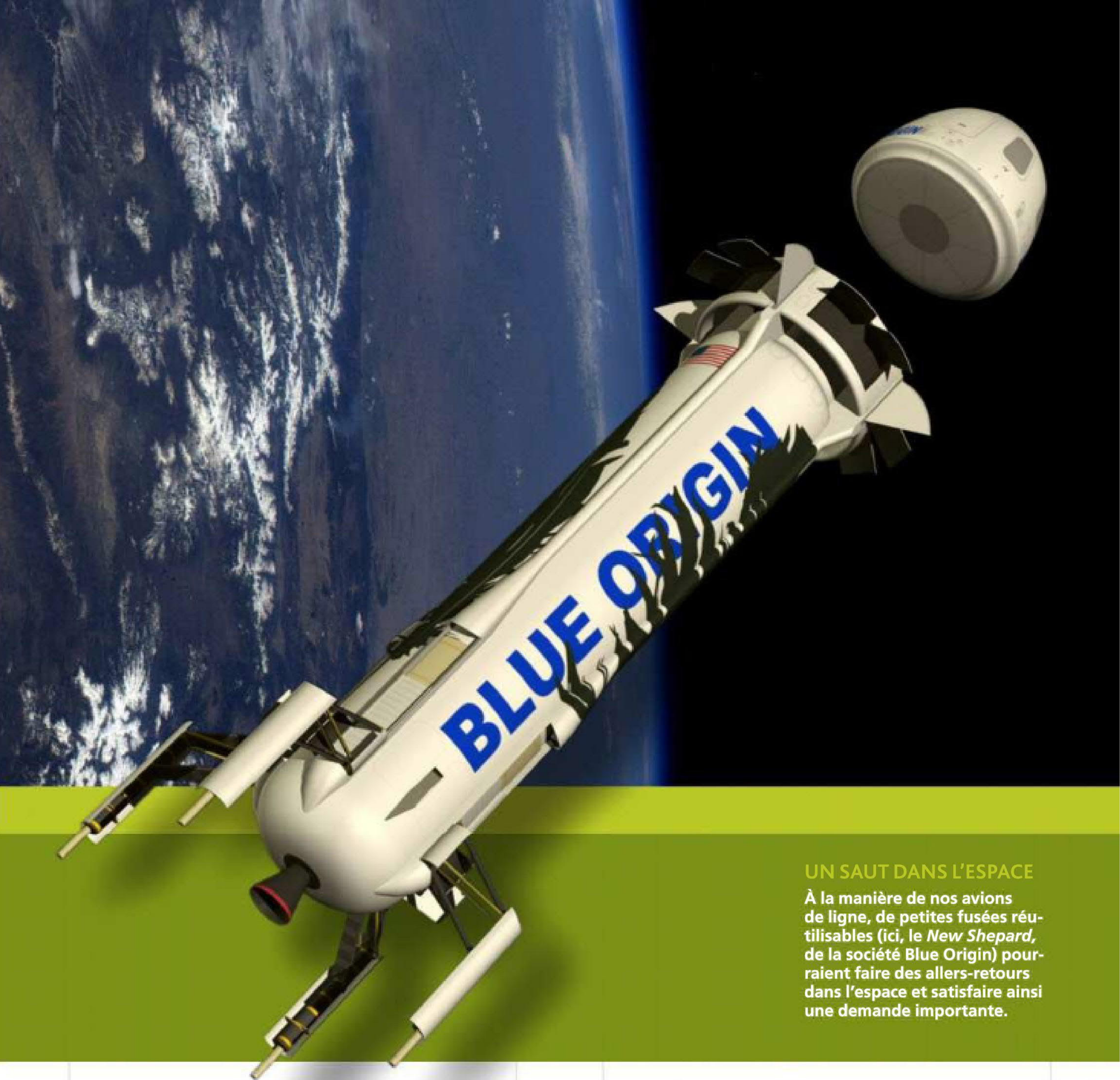


PAS AVANT 2017

Dépasser les 100 km d'altitude

Moins coûteux et plus facile à organiser qu'un vol en orbite, le vol suborbital pourrait permettre à tout un chacun de se prendre pour un astronaute en passant quelques minutes dans l'espace. À condition que la sécurité s'améliore…

« Bienvenue au spatioport de Bordeaux. Nous vous souhaitons un séjour des plus planants ! » Le premier complexe de tourisme spatial de France est plein à craquer en ce début d'été. Dans la piscine, pas de ballon ni de matelas gonflable, mais des enfants en combinaisons spatiales qui s'habituent à la sensation d'impesanteur au fond de l'eau. Au sein d'un immense bâtiment circulaire, la centrifugeuse permet à chacun d'expérimenter l'accélération impressionnante que l'on ressent à l'intérieur d'un vaisseau spatial. Et tandis que certains s'habituent au vol mouvementé dans un petit avion supersonique, d'autres achèvent leur séjour en embarquant pour le vol suborbital, qui fera officiellement d'eux des astronautes.



UN SAUT DANS L'ESPACE

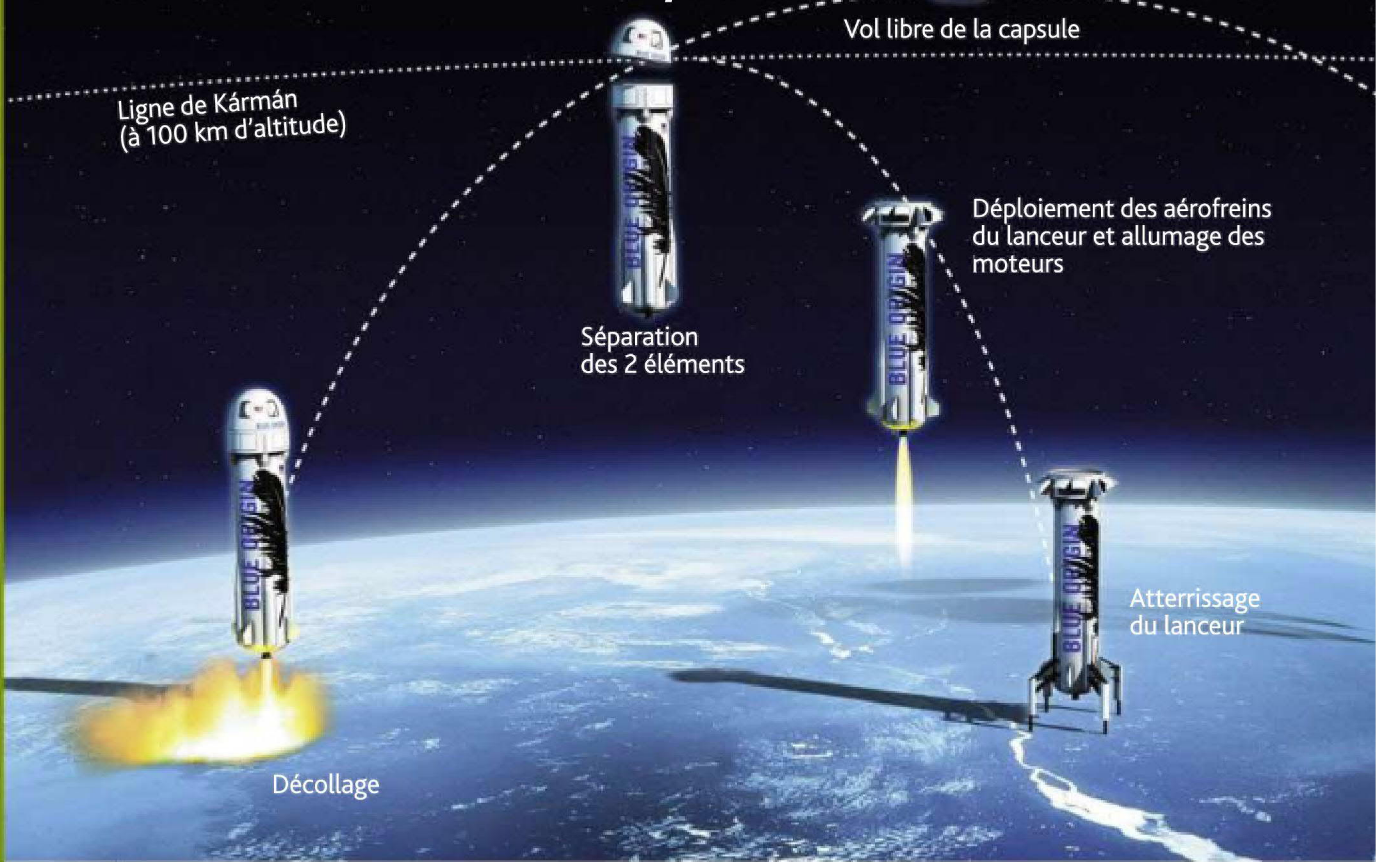
À la manière de nos avions de ligne, de petites fusées réutilisables (ici, le *New Shepard,* de la société Blue Origin) pourraient faire des allers-retours dans l'espace et satisfaire ainsi une demande importante.

R. GARAN/NASA - THE BLUE ORIGIN

L'idée d'un tel parc d'attractions fait rêver des milliers d'aventuriers autour du globe. En réalité, le concept de tourisme spatial ne date pas d'hier. Depuis l'envoi des premiers hommes dans l'espace, au cours des années 1960, nombreux sont les rêveurs qui s'imaginent astronautes d'un jour. Et, dès les années 1990, certaines compagnies ont présenté des idées de fusées saugrenues, comme le Kankoh-Maru japonais, qui devait permettre à 50 passagers de séjourner en orbite. Mais ces projets, bien trop chers et trop risqués, n'ont jamais abouti et, jusqu'à récemment, personne ne pensait sérieusement avoir l'opportunité de voyager dans l'espace un jour.

En ce début de XXIe siècle, les choses ont changé : *« Nous n'avons jamais été aussi proches d'ouvrir le vol spatial aux particuliers,* soutient Hoppy Price, du Jet Propulsion Laboratory appartenant à la Nasa. *Je suis certain qu'il ne reste plus que quelques années à attendre. »* Avril 2001 avait déjà marqué un tournant pour le vol spatial, vers une plus grande accessibilité : le 28, le millionnaire américain et féru d'astronomie Dennis Tito réalise son rêve d'enfant en devenant le premier touriste spatial, c'est-à-dire le premier homme à payer pour aller dans l'espace. La somme est mirobolante : pour un séjour de sept jours sur la Station spatiale internationale (ISS), Tito aurait versé pas moins de 20 millions de dollars à l'agence spatiale fédérale russe chargée de l'acheminer vers l'ISS dans une de ses fusées *Soyouz* ! Le voyage se passant sans problème, l'Américain fait

Le vol suborbital du *New Shepard*



des envieux. Dans les années qui suivent, six millionnaires font à leur tour l'expérience d'un séjour similaire, déboursant chacun entre 20 et 30 millions de dollars, et inaugurant ainsi le tourisme de l'espace.

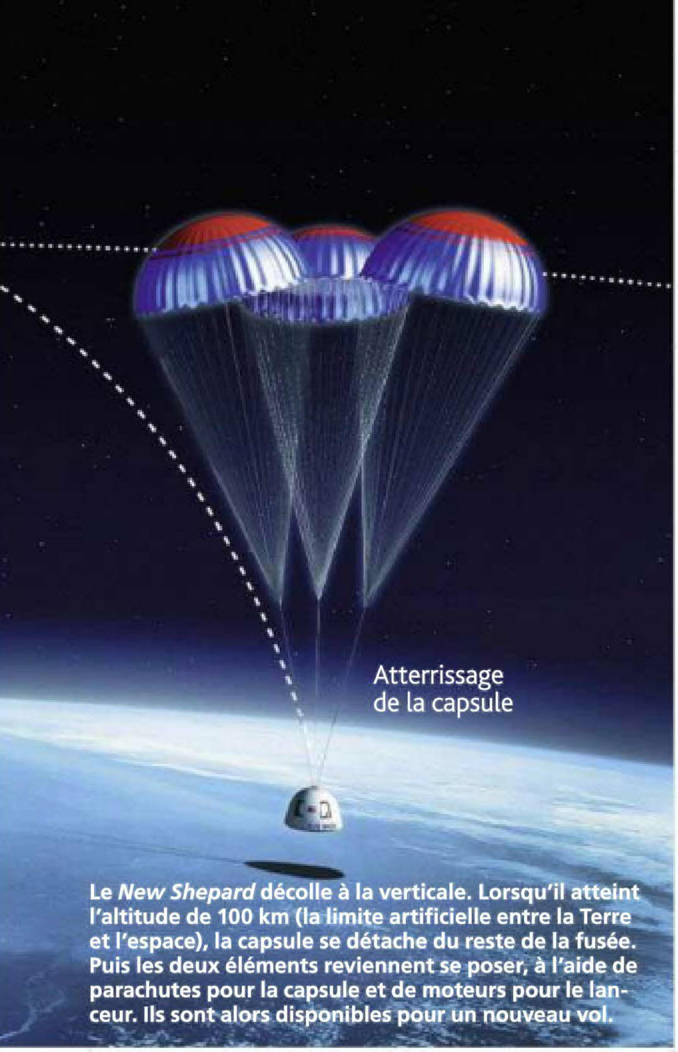
L'EXPÉRIENCE DE L'APESANTEUR

Toutefois, si ces expériences palpitantes en font fantasmer plus d'un, *« il s'agit d'épiphénomènes, qui ne peuvent toucher qu'une infime portion de la population : les personnes assez riches pour se payer le voyage,* relativise Christophe Bonnal, expert à la direction des lanceurs du Centre national d'études spatiales (Cnes). *Ces vols vers l'ISS, que l'on appelle les vols orbitaux, sont toujours assez rares, et même d'ici une dizaine d'années, je ne pense pas qu'ils concerneront plus de dix personnes par an. »* De plus, les passagers d'un tel voyage doivent subir un entraînement rude et contraignant de plusieurs mois afin de préparer leur vol. Un autre obstacle au tourisme orbital de masse.

Pour répondre à l'incroyable demande du public avide d'expérience spatiale, entrepreneurs et ingénieurs ont ainsi imaginé un autre moyen d'autoriser l'accès de tous à l'espace, moins coûteux et plus facile à mettre en place qu'un vol orbital. Il s'agit de ce qu'on appelle le vol suborbital, dont le principe est un voyage à bord d'un appareil capable de dépasser la ligne de Kármán, limite arbitraire entre la Terre et l'espace, à 100 km d'altitude. C'est simple : en dessous de cette frontière, vous êtes un Terrien, au-delà, un astronaute. L'idée ne serait donc pas de séjourner réellement dans l'espace, mais d'y accéder quelques instants pour profiter d'une vue somptueuse sur notre planète bleue, admirer un ciel noir et constellé d'étoiles en plein jour et passer quelques minutes en apesanteur.

L'idée est de passer quelques instants dans l'espace pour profiter d'une vue somptueuse sur notre planète bleue

Ce type de vol présenterait de nombreux avantages. Tout d'abord, il serait beaucoup moins coûteux qu'un vol orbital. *« Ne serait-ce qu'en termes d'énergie, un vol suborbital requiert environ 1 mégajoule par kilogramme que l'on veut emporter, contre près de 34 pour le vol orbital »,* précise Christophe Bonnal. De plus, les vols suborbitaux auraient une durée assez courte, de quelques dizaines



Le *New Shepard* décolle à la verticale. Lorsqu'il atteint l'altitude de 100 km (la limite artificielle entre la Terre et l'espace), la capsule se détache du reste de la fusée. Puis les deux éléments reviennent se poser, à l'aide de parachutes pour la capsule et de moteurs pour le lanceur. Ils sont alors disponibles pour un nouveau vol.

G. CIRADE

de minutes tout au plus. Il serait donc possible pour les pilotes et les machines d'en enchaîner plusieurs par jour, à la manière de nos avions de ligne, et de satisfaire ainsi une demande importante.

Dès la fin des années 1990, cette direction semble très intéressante pour répondre aux désirs de tourisme spatial. Mais pas une seule entreprise ne souhaite se lancer, pour des raisons principalement budgétaires. Afin d'encourager le développement privé de l'industrie spatiale, un concours est donc organisé en 1996 aux États-Unis sous l'impulsion de l'ingénieur Peter Diamandis : l'Ansari X Prize. Il s'agit de récompenser d'une somme de 10 millions de dollars la première entreprise privée capable d'amener trois passagers à 100 km d'altitude. Pour être validé, le vol doit être accompli deux fois à une semaine d'intervalle et avec le même matériel. La liste des inscrits s'étoffe rapidement, et une vingtaine d'entreprises sont en lice.

Le 4 octobre 2004, l'avion expérimental *SpaceShipOne*, conçu par l'ingénieur américain Burt Rutan, réalise l'exploit et remporte le prix. Sa spécificité : l'avion ne décolle pas directement du sol, il est largué à 16 000 m d'altitude par son avion porteur, le *White Knight*. Le concours est une réussite : il a permis la construction d'un premier prototype d'avion suborbital et a généré un grand engouement pour le tourisme spatial. Alors qu'il assistait au spectacle suborbital de *SpaceShipOne*, Richard Branson, le milliardaire américain patron de l'entreprise Virgin, a eu des étoiles plein les yeux. Lui aussi a des rêves d'espace et souhaite les rendre accessibles au plus grand nombre. Quelques années plus tard, il commande quatre *SpaceShipTwo*, possédant les principales caractéristiques de l'avion gagnant du concours, mais conçus pour emporter chacun sept personnes au lieu de trois au-delà de la ligne de Kármán. La course aux vols suborbitaux est lancée !

PREMIÈRES RÉSERVATIONS

Les premiers essais du *SpaceShipTwo* et de son avion porteur, entre 2008 et 2012, sont tout à fait impressionnants. Les ingénieurs procèdent étape par étape : d'abord des tests du moteur au sol, puis des vols planés, suivis d'un allumage des moteurs en plein vol. Et tout se passe à merveille. À tel point que la compagnie de Richard Branson, nouvellement nommée Virgin Galactic, envisage le début de ses vols commerciaux pour 2013, et commence même à prendre des centaines de réservations à 200 000 dollars le billet. Mais les choses se compliquent pour l'entreprise. Le système de propulsion hybride, combinant des propulseurs à poudre et d'autres à ergols liquides, pose de nombreux problèmes, ce qui oblige l'entreprise à repousser l'ouverture de ses vols commerciaux. Puis, en 2014, c'est le drame. *« Alors qu'il effectuait son troisième vol test, qui devait l'emmener à Mach 1, le*

UN AVANT-GOÛT D'ESPACE

Certaines compagnies proposent déjà des vols dits paraboliques qui permettent à tous d'expérimenter la micropesanteur, état où le corps est soumis à une pesanteur extrêmement faible. Le principe est de faire grimper un Airbus A310 jusqu'à 8 500 m d'altitude, puis de le laisser chuter pendant 22 petites secondes, durant lesquelles les passagers flottent librement dans la cabine. Durant cette courte période, le pilote enclenche les moteurs vers le bas pour aider à la chute et compenser le ralentissement dû aux frottements de l'air. En France, il est possible de faire l'expérience d'un vol parabolique depuis l'aéroport de Bordeaux. Pour 6 000 €, vous embarquez dans un avion qui enchaînera une quinzaine de paraboles. S'ils permettent d'expérimenter brièvement l'apesanteur, ces vols ne font pas de vous des astronautes. Seuls les vols suborbitaux, qui s'accompagneraient de 4 à 6 minutes d'apesanteur, pourraient offrir ce privilège.

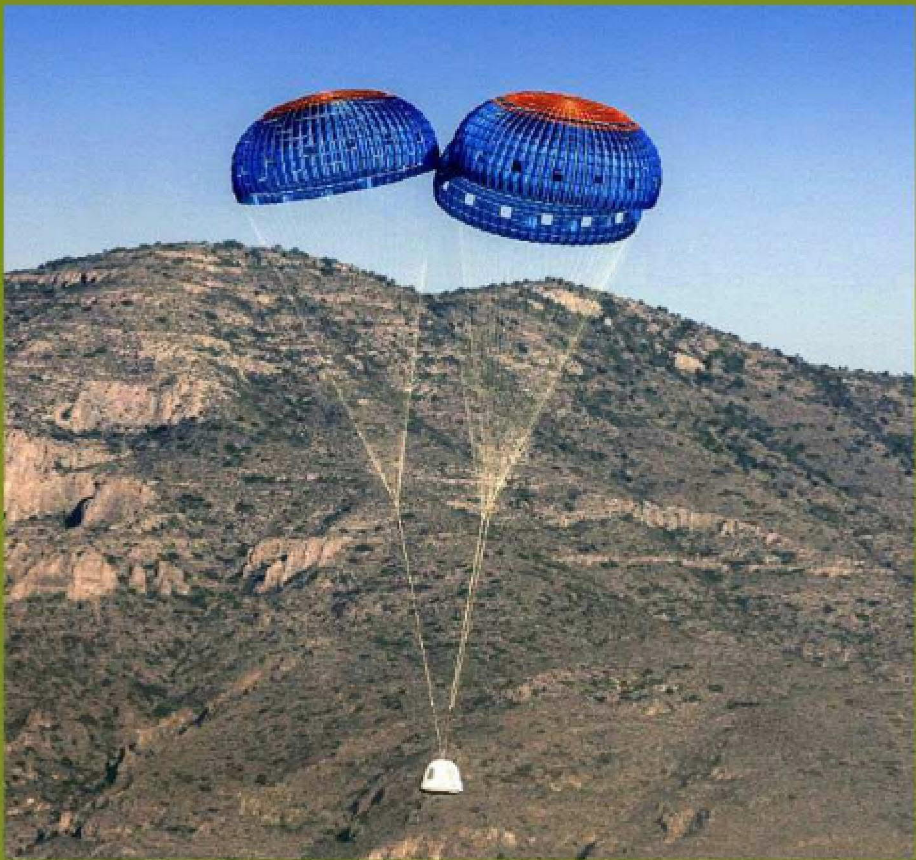


SpaceShipTwo *s'est disloqué en plein vol,* se souvient Hoppy Price. *Une triste erreur de pilotage qui a coûté la vie à l'un des pilotes et a grièvement blessé le second. »* Cette catastrophe a marqué un coup d'arrêt pour Virgin Galactic, qui a eu du mal à s'en remettre. Toujours dans la course, malgré tout, elle a présenté le 10 mars dernier son nouvel avion. Mais la société de Richard Branson cumule deux handicaps : désormais, elle jouit d'une mauvaise image auprès du public et elle a pris beaucoup de retard sur ses concurrents.

Avant toute exploitation massive du tourisme spatial, il faudra améliorer considérablement la fiabilité des moteurs

Car, entre-temps, d'autres projets ont vu le jour. Ainsi, la compagnie Xcor Aerospace a commencé à travailler sur le *Lynx*, un projet d'avion biplace qui décolle directement du sol pour atteindre une haute altitude. L'engin devait être muni de quatre moteurs de fusée fonctionnant à l'oxygène liquide et au kérosène. Mais alors que les premiers vols tests devaient s'effectuer cette année, la compagnie a annoncé en juin l'arrêt du développement du *Lynx* pour se concentrer sur d'autres projets. Un retrait qui pourrait s'expliquer par l'avance phénoménale prise par un autre concurrent sérieux au *SpaceShipTwo* : le *New Shepard*.

Conçu par la société Blue Origin, du magnat américain et patron d'Amazon Jeff Bezos, le *New Shepard* est ce qui se rapproche le plus d'une fusée classique. Pouvant accueillir 4 à 6 personnes, l'engin décolle à la verticale jusqu'à atteindre sa hauteur maximale, au-delà de 100 km. La capsule contenant les passagers se détache alors du reste de la fusée, et les deux éléments reviennent se poser, à l'aide de parachutes pour la capsule et de moteurs pour l'étage. Cette notion de réutilisation des différents éléments qui composent le véhicule est fondamentale si l'on souhaite passer d'ici quelques années à un tourisme de masse. En effet, on ne peut pas imaginer effectuer des milliers de vols par an avec des véhicules jetables, le coût financier et environnemental serait trop important. En juin 2016, la compagnie a réalisé son quatrième vol suborbital non-habité, démontrant une nouvelle fois



PREMIERS VOLS RÉUSSIS

Développé par Blue Origin, le *New Shepard* a déjà réussi 4 vols d'essais. La maîtrise de la récupération de ce lanceur suborbital et sa réutilisation n'étant plus à faire, Blue Origin se concentre désormais sur la sécurité. Ainsi, lors du dernier vol test, le 19 juin, la capsule s'est posée en douceur avec seulement deux parachutes, au lieu des trois habituels. Mais avant d'embarquer des passagers, le *New Shepard* devra d'abord voler avec un pilote d'essai, ce qui est annoncé pour l'année prochaine.

THE BLUE ORIGIN

la possibilité de réutilisation de son équipement. Et, récemment, Jeff Bezos a annoncé que sa fusée accomplirait son premier vol suborbital avec pilote d'essai au cours de l'année 2017.

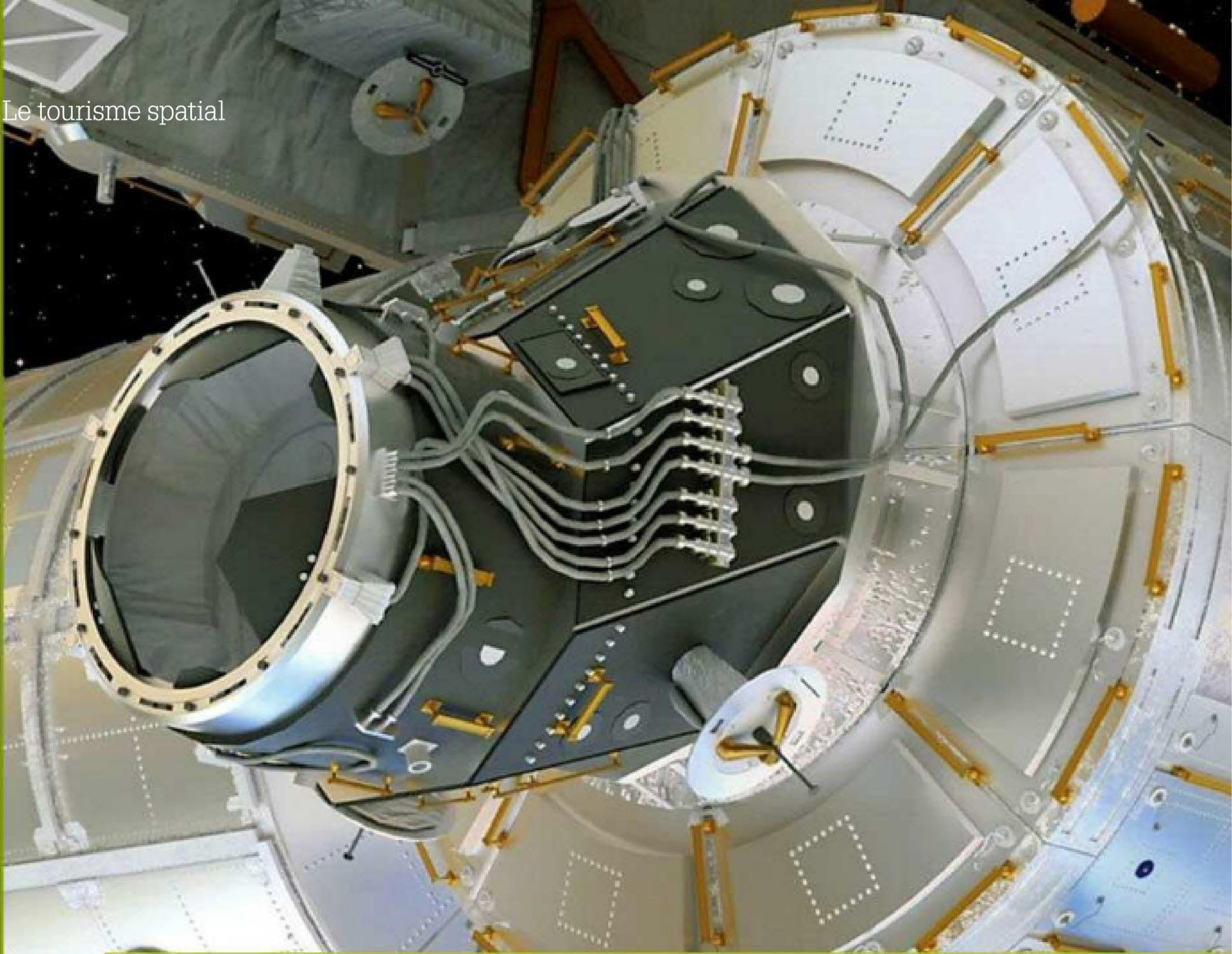
50000 PASSAGERS PAR AN

« Aujourd'hui, ce projet est le plus crédible, déclare Christophe Bonnal. *Or, une chose est certaine : le premier qui se révélera concluant sur un nombre important de vols tests aura le monopole du marché. Et je pense qu'à terme, si une solution fonctionne dans quelques années, il n'est pas déraisonnable d'imaginer 50000 passagers par an pour des vols suborbitaux. »*

Même si ces projets sont prometteurs, il reste encore du chemin avant qu'ils ne se concrétisent. Le plus gros frein à la banalisation du tourisme spatial est pour l'instant la question de la propulsion. Chacune des trois solutions présentées utilise un ou plusieurs moteurs de fusée, ce qui pose pas mal de problèmes. Ce sont des systèmes extrêmes : la pression y est phénoménale, de même que la température, qui passe de –205 à 3000 °C en quelques secondes. Les moteurs sont donc sujets à une usure rapide et leur fiabilité en prend un coup.

« Aujourd'hui, toutes les compagnies utilisent des moteurs de fusée, qui peuvent avoir une fiabilité avoisinant les 99 %, continue Christophe Bonnal. *Ajoutons, pour relativiser, que parmi les 1 % de problèmes potentiels, seulement 1 % à nouveau sont de type explosion en plein vol. En gardant cette même fiabilité, cela impliquerait qu'un vol sur 10000 en moyenne explose. Si l'on imaginait une situation avec 10000 vols par an et 50000 passagers, nous arrivons donc à une moyenne de cinq morts par an, ce qui est peu, mais pas acceptable pour le secteur du tourisme ! »* Avant toute exploitation massive du tourisme spatial, il faudra donc améliorer considérablement la fiabilité des moteurs afin de minimiser les risques d'accident.

Une tâche qui, les spécialistes en sont convaincus, sera accomplie sous peu. D'ici quelques années, il sera possible, moyennant une somme rondelette, de décrocher son billet pour l'espace. Partout dans le monde, les spatioports, ces parcs d'attractions autour du spatial, se développeront, ouvrant la voie à des séjours de luxe pour toute la famille se concluant par le vol suborbital. Les rêves d'espace des astronautes en herbe (de familles fortunées !) deviendront alors réalité… ●





PAS AVANT 2020

Séjourner à bord de l'ISS

Toucher du doigt les merveilles de l'espace lors d'un vol suborbital sera à coup sûr une aventure extraordinaire. Mais ce n'est qu'un avant-goût d'espace. Rien à voir avec ce qu'ont vécu les sept milliardaires qui ont séjourné une dizaine de jours dans la Station spatiale internationale (ISS) : des vacances qui les mettaient réellement dans la peau d'un astronaute. Il y a donc fort à parier que lorsqu'un touriste aura testé le vol suborbital, il souhaitera à son tour faire l'expérience d'un vrai séjour dans l'espace. Contempler à toute heure de la journée un ciel noir et scintillant d'étoiles au-dessus de l'atmosphère, manger et boire en gravité zéro, et se réveiller tous les matins avec une vue extraordinaire sur la Terre : c'est ça qui fait rêver !

Mais aujourd'hui, envoyer des humains jusqu'à l'ISS n'est pas aisé. Depuis le retrait de la navette spatiale américaine en 2011, les seuls vaisseaux capables d'effectuer un voyage habité sont les fusées russes *Soyouz*. Et les places sont très limitées : le programme Soyouz prévoit un peu plus d'une mission par an, avec des vaisseaux pouvant accueillir trois personnes, dont deux pilotes. Pour passer à une activité touristique, il faudrait donc agrandir les vaisseaux et multiplier la fréquence de ces vols. Plusieurs compagnies y travaillent donc depuis des années. Parmi elles, l'entreprise américaine SpaceX a déjà beaucoup d'avance, puisqu'elle collabore depuis 2012 avec la Nasa pour approvisionner l'ISS en matériel divers. Dirigée par Elon Musk, la compagnie améliore actuellement sa capsule *Dragon*, au préalable utilisée uniquement pour le fret, afin de la rendre habitable. Et elle a réussi, le 8 avril, lors d'un envoi de la capsule vers l'ISS, à reposer le premier étage de son lanceur *Falcon 9* sur une barge flottante. Le fait de pouvoir réutiliser le même matériel pour plusieurs vols conditionne aujourd'hui l'expansion du tourisme spatial.

Autre paramètre déterminant pour développer le tourisme orbital, l'hébergement. Il n'existe à ce jour qu'un lieu capable d'accueillir des astronautes : l'ISS. Et les places sont très limitées : avec 400 m³ d'espace habitable encombrés de matériel, elle ne peut loger plus de 6 personnes simultanément. Difficile d'imaginer développer une activité



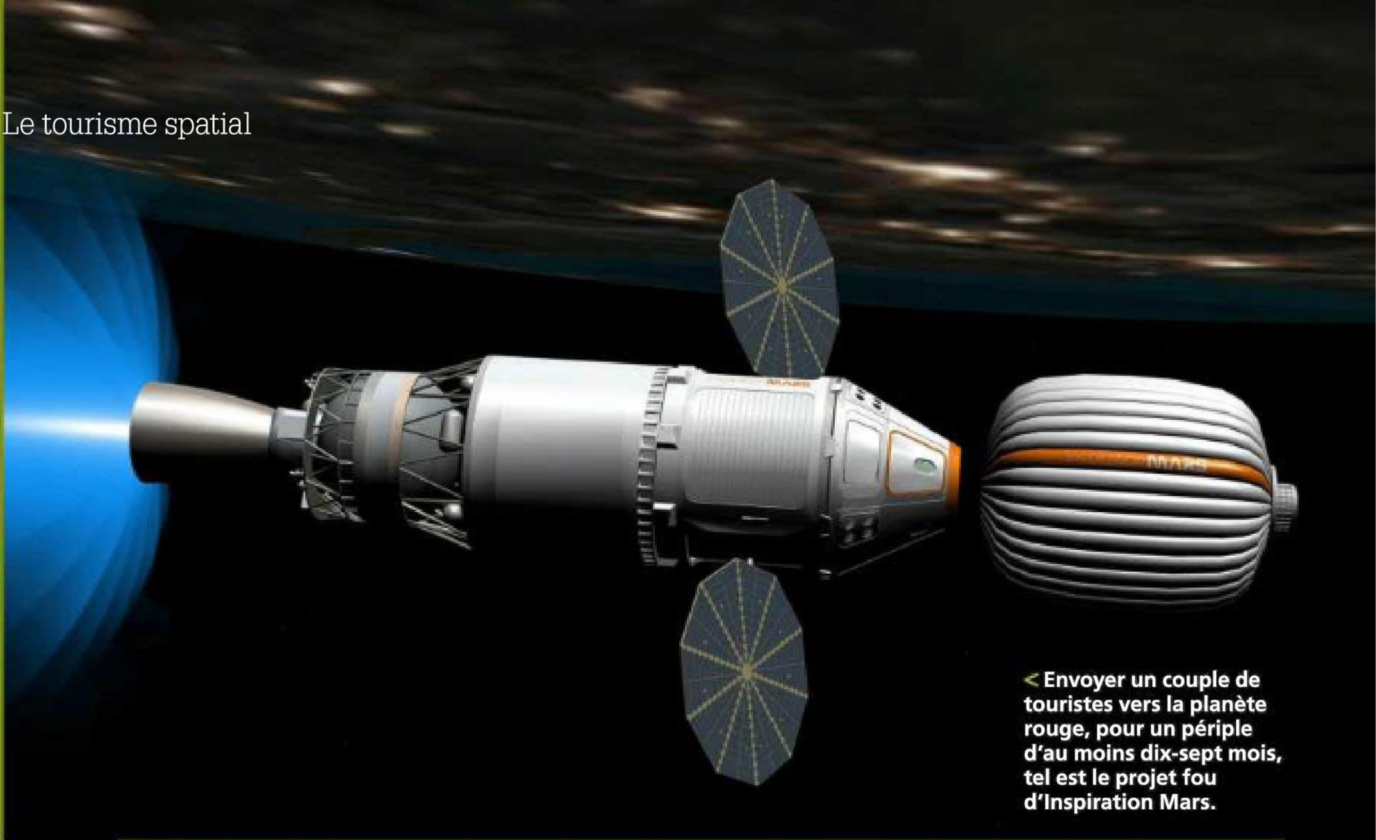
< Une solution pour augmenter la capacité d'accueil de l'ISS : y ajouter des modules gonflables (ici, le module test Beam, de 16 m³, installé en mai).

touristique dans ces conditions… Un problème que Bigelow Aerospace, fondée en 1999 par l'Américain Robert Bigelow, patron de la chaîne d'hôtellerie Budget Suites of America, se propose de résoudre.

UNE IDÉE… GONFLÉE

Pour cela, l'entreprise a eu l'idée d'envoyer en orbite des modules gonflables ultrarésistants et capables d'accueillir un grand nombre d'astronautes. Les avantages par rapport à une station classique en aluminium sont conséquents. Tout d'abord, la structure de base est compacte. Sur le même principe qu'une tente pliable, les modules ne s'étendent qu'une fois en orbite, ce qui permet de faciliter grandement leur transport. Et la protection contre les radiations cosmiques et les éruptions solaires est renforcée, de même que la résistance aux impacts de débris spatiaux. *« Nous utilisons un matériau de type Kevlar pour les parois de nos modules. De nombreux tests ont été effectués et nos produits sont au moins aussi résistants que l'ISS »,* précise Mike Gold, le directeur des opérations de Bigelow Aerospace. Enfin, selon l'entreprise, leurs structures gonflables sont beaucoup moins coûteuses qu'une station classique.
Après le succès de deux prototypes, *Genesis I* et *Genesis II*, mis en orbite en 2006 et 2007, Bigelow Aerospace a placé dans la capsule *Dragon,* embarquée dans le vol *SpaceX* du 8 avril, un troisième module, le Beam. D'un volume de 16 m³, celui-ci s'est attaché à l'ISS. Et il s'est parfaitement déployé le 28 mai. Par la suite, l'entreprise prévoit d'envoyer deux modules similaires appelés B330 d'un volume de 330 m³ chacun. L'ISS aura alors doublé sa surface habitable et pourra accueillir douze astronautes en même temps.
Dans un futur plus lointain, une fois que la question du transport aura été réglée, il est probable que même l'ISS améliorée ne suffise plus à répondre aux besoins du tourisme. Bigelow ou d'autres compagnies construiront alors certainement une nouvelle station autour de la Terre. Puis deux. Puis peut-être une troisième. Et nous pourrons alors séjourner dans des hôtels spatiaux fabuleux et se préparer tranquillement pour la prochaine étape du tourisme spatial.

BIGELOW AEROSPACE



< Envoyer un couple de touristes vers la planète rouge, pour un périple d'au moins dix-sept mois, tel est le projet fou d'Inspiration Mars.

INSPIRATION MARS FOUNDATION



PAS AVANT 2021

Survoler la Lune ou Mars

D'ici quelques dizaines d'années, ceux qui auront goûté au vol suborbital ou au séjour en station spatiale rêveront peut-être de voyages plus incroyables encore. Qu'est-ce qui fera alors palpiter le cœur de ces aventuriers de l'espace ? La compagnie Space Adventures, qui a déjà envoyé sept richissimes touristes séjourner dans la Station spatiale internationale, déborde de projets. Le plus impressionnant : un vol autour de la Lune ! Il s'agirait d'envoyer deux touristes dans une fusée *Soyouz* qui s'approchera jusqu'à 100 km de notre satellite. Elle en ferait ensuite un tour complet, offrant aux passagers un lever de Terre, ainsi que la découverte de la face cachée de la Lune. La fusée reprendrait ensuite la direction de la Terre, où la capsule se poserait en douceur grâce à un immense parachute. Un voyage d'une dizaine de jours, proposé dès à présent par l'entreprise. *« C'est sans conteste la prochaine étape du tourisme spatial,* affirme Hoppy Price, de la Nasa. *Mais les prix sont encore trop élevés. »* À 150 millions de dollars, pas étonnant que les clients soient rares ! L'entreprise affirme avoir déjà un premier acheteur pour ce vol, et attendre le second pour se lancer.

LE COUP DE POUCE DE VÉNUS

Mais l'expérience spatiale ultime serait une mission de plusieurs mois avec pour objectif un survol de la planète Mars ! Cela peut sembler totalement irréaliste, mais certains en parlent très sérieusement. Notamment Dennis Tito, premier touriste de l'espace, qui porte à bout de bras le projet Inspiration Mars. Son ambition : envoyer un couple de touristes vers la planète rouge. Ils parcourraient les quelques dizaines de millions de kilomètres qui nous séparent de notre voisine en près de huit mois. S'ensuivrait un bref survol de la planète, avant de reprendre la direction de la Terre pendant neuf nouveaux mois… Dennis Tito comptait profiter d'un alignement particulier de la Terre et Mars en janvier 2018 pour lancer sa mission. Mais il semble que son projet ait été repoussé par manque de financement, et la prochaine fenêtre de tir équivalente ne se présentera pas avant 2033. Une occasion un peu différente se profilerait en 2021 : les planètes ne seront pas dans un alignement optimal, mais la fusée pourrait profiter de la présence de Vénus sur son chemin pour se propulser plus rapidement jusqu'à Mars. Même s'il fait rêver, ce projet est loin d'être réalisé. Il faudrait à Tito un total de 1,5 milliard de dollars pour l'entreprendre. *« Et encore, l'argent n'est pas le plus grand obstacle,* conclut Christophe Bonnal, expert au Cnes. *Comment faire pour emmener assez de vivres et d'oxygène pour un si long vol ? Quelle technologie utiliser ? Comment faire face aux éventuels problèmes psychologiques qui pourraient accompagner un voyage si long ? »* Autant de questions à considérer avant d'embarquer pour une telle folie.